



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

KONSTRUKČNÍ NÁVRH MALÉ MODELÁŘSKÉ CNC FRÉZKY

DESIGN OF SMALL HOBBY CNC MILLING MACHINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Večeř

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Pavlík, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Bc. Petr Večeř
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní stroje, systémy a roboty
Vedoucí práce:	Ing. Jan Pavlík, Ph.D.
Akademický rok:	2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Konstrukční návrh malé modelářské CNC frézky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhněte a konstrukčně zpracujte řešení malé modelářské CNC frézky. Frézka bude primárně určena k obrábění plastu, dřeva, popřípadě lehkých slitin (AL, Zn, ...). Pro konstrukci frézky využijte maximum dostupných standardizovaných dílů.

Cíle diplomové práce:

- 1) Důkladná analýza problematiky
- 2) Návrh variant řešení
- 3) Konstrukční návrh vybrané varianty - 3D model
- 4) Výpočtová dokumentace
- 5) Výkresová dokumentace vybraných uzlů

Seznam literatury:

MAREK, J., NOVOTNÝ, L., SMOLÍK, J., BLECHA, P., BŘEZINA, T., MRKVICA, I., SULITKA, M., UČEŇ, O. (2010): Konstrukce CNC obráběcích strojů. MM publishing s.r. o, Praha, ISBN: 978-80-2-4-7980-3.

Shigley J.E., Mischke Ch.R., Budynas R.G. (2010): Konstruování strojních součástí. ISBN 978-80-2-4-2629-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem malé modelářské CNC frézky. V práci je zahrnuta rešerše modelářských CNC frézek dostupných především na českém trhu, na jejímž základě jsou následně voleny vhodné parametry pro konstruovaný stroj. Součástí diplomové práce jsou dále konstrukční výpočty, volba vhodných komponent, výrobní výkresy a 3D model, ze kterého je patrné výsledné řešení konstruovaného zařízení.

ABSTRACT

This thesis deals with the structural design of small model CNC milling machines. The work includes research modeller CNC milling machines available primarily on the Czech market, on whose basis are then selected the appropriate parameters for machine design. The thesis contains further structural calculations, selection of appropriate components, production drawings and 3D model that shows the final solution of constructed facility.

KLÍČOVÁ SLOVA

CNC frézka, modelářská CNC frézka, portálová frézka, konstrukce CNC frézky

KEYWORDS

CNC milling machine, modeller CNC milling machine, gantry milling machine, construction of CNC milling machine

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VEČEŘ, P. *Konstrukční návrh malé modelářské CNC frézky*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2016, 74 s., Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Pavlík, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

V této části bych chtěl poděkovat především vedoucímu této práce, panu Ing. Janu Pavlíkovi, Ph.D. za věcné rady a připomínky při zpracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval své přítelkyni za morální podporu a své rodině za morální a finanční podporu při studiu.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením pana Ing. Jana Pavlíka, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 27.5.2016

.....

Večeř Petr

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	FRÉZOVACÍ STROJE.....	12
2.1	Stolní frézky	12
2.2	Portálové frézky.....	13
2.2.1	Portálová frézka typu spodní gantry	13
2.2.2	Portálová frézka typu horní gantry	14
2.2.3	Portálová frézka s pohyblivým stolem.....	14
3	MALÉ CNC FRÉZKY SOUČASNÉ PRODUKCE.....	15
3.1	Modelářské frézky firmy Merkur	15
3.1.1	MC30FT.....	15
3.2	Modelářské frézky firmy BOW divize CNC strojů NUMCO.....	16
3.2.1	Modelářská frézka NUMCO KX3.....	16
3.2.2	CNC router SHG 0404.....	17
3.3	CNC zařízení firmy CNC Konečný	19
3.3.1	CNC router řady RM SX	19
3.4	CNC frézka TRON	20
3.5	CNC zařízení firmy Cau Cau	21
3.5.1	3D CNC frézka Kompas F-600	21
3.6	CNC frézky firmy GRAVOS	22
3.6.1	3D CNC router IK 500.....	22
4	CELKOVÉ POROVNÁNÍ MALÝCH CNC FRÉZEK	23
5	KONSTRUKCE MODELÁŘSKÉ FRÉZKY	26
5.1	Volba technických parametrů pro návrh frézky	26
5.2	Výpočet řezných parametrů a sil při obrábění.....	27
5.2.1	Frézování.....	27
5.2.2	Vrtání	28
5.3	Volba vřetene.....	30
5.4	Varianty řešení lineární posuvové soustavy.....	32
5.4.1	Návrh pohonu osy X	33
5.4.2	Návrh pohonu osy Y	38
5.4.3	Návrh pohonu osy Z	41
5.5	Varianty řešení vedení stroje	46
5.5.1	Návrh vedení osy x	48
5.5.2	Návrh vedení osy Y a Z	53
5.6	Konstrukce stroje	53
5.6.1	Základna stroje	53
5.6.2	Příčnick stroje.....	55
5.6.3	Saně a vřeteník stroje	56
5.7	Řídicí systém stroje.....	57
5.7.1	Armote	57
5.7.2	Mach 3.....	57
5.7.3	LinuxCNC	57
5.7.4	Volba řídicího systému pro malou modelářskou CNC frézku	58
5.8	Třiskové hospodářství, ochranné kryty a bezpečnostní prvky	58
5.9	Příslušenství stroje	61

5.9.1	Ruční ovladač	61
5.9.2	Pevný senzor osy z.....	61
5.9.3	Čtvrtá – rotační osa	61
5.10	3D model navrženého stroje MMF 2016 a jeho parametry.....	62
6	ZÁVĚR	65
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	66
8	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, TABULEK A OBRÁZKŮ.....	68
8.1	Seznam tabulek	71
8.2	Seznam obrázků	72
9	SEZNAM PŘÍLOH	74

1 ÚVOD

Modelářská CNC frézka je strojní zařízení, které slouží k obrábění především dřeva, plastů a slitin hliníku, nicméně nelze přesně definovat potřeby a požadavky „modeláře“, kterými mohou být i obrábění oceli. Dostupné modelářské frézky na trhu lze profilovat od hobby kategorií až po frézky, jenž nachází profesionální využití ve výrobě.

Modelářské CNC frézky lze dále dělit podle konstrukce stejně jako produkční frézky, a to na frézky konzolové, stolové, rovinné, které se dále mohou dělit na portálové s pevným portálem a posuvným stolem, portálové s posuvným portálem (spodní gantry) a portálové s posuvným příčником (horní gantry). Všechny portálové koncepce modelářských frézek mohou být nazývány taktéž CNC routery, které slouží především ke gravírování v truhlářských dílnách (obrábění dřevěných materiálů), v elektro-technice pro vrtání laminátových destiček plošných spojů, pro gravírování reklamních tabulí nebo také v modelářských dílnách. Nedílnou součástí jsou i takzvané 3D CNC routery, které umožňují nejen gravírování, ale i klasické frézování požadovaného materiálu. Konstrukcí takového routeru se bude zabývat tato práce. [2]

Dalším kritériem dělení může být, jakožto již v každém odvětví, cena. Dostupné modelářské CNC frézky (CNC routery) se cenově pohybují od řádů desetitisíců až po statisíce. Nejlevnější frézky plní účely především výukové, mají malou tuhost a nízkou produktivitu práce. Tuhost je u modelářské frézky při konstrukci stejně důležitým parametrem jako u každého jiného obráběcího stroje. Pro produktivní obrábění je nutno zkonstruovat dostatečně tuhý stroj, který se nebude potýkat s velkými vibracemi.

V posledních letech zažily rozmach amatérské konstrukce modelářských frézek, kdy se se snižující cenou a dostupností potřebných dílů do stavby pouští mnoho amatérských kutilů. Při konstrukčním řešení této práce jsou rovněž využívány dosavadní zkušenosti uživatelů s reálně zkonstruovanými stroji. Většině amatérsky zkonstruovaným zařízením chybí pro produktivní obrábění dostatečná tuhost stroje, která ovlivňuje výslednou přesnost obrobku.

2 FRÉZOVACÍ STROJE

Frézovací stroje patří mezi nejrozšířenější obráběcí stroje, které jsou určeny pro obrábění nejčastěji ploch rovinných, ale i rovných a zakřivených drážek, zubů ozubených kol atd. [2]

Při frézování je dle orientace polohy vůči obrobku využíváno frézování obvodové nebo čelní. Dle orientace hlavních pohybů (rotační řezný pohyb a posuvový pohyb) je frézování děleno na sousledné a nesousledné. [2]

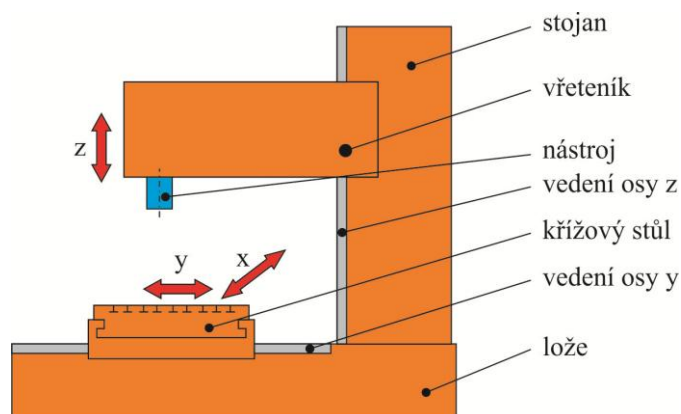
Frézovací stroje se dle druhu konstrukční koncepce a druhu frézovacích operací, jak již bylo uvedeno, dělí na: konzolové frézky, stolové frézky, rovinné frézky a speciální frézky (na závity, na ozubení, atd.). Dále je možné dělení (jako u ostatních obráběcích strojů) dle řízení. Stroje mohou být řízeny konvenčně (manuálně pomocí klik a pák), číslicově řízeny pomocí děrných štítků (NC) a počítačem řízené (CNC). [2]

Dalším možným kritériem pro rozdělení frézovacích strojů může být jejich velikost. Tato práce se zabývá modelářskou CNC frézku, která spadá do kategorie malých CNC frézek. Do kategorie malých strojů lze zařadit stroje dosahující malých výkonů a malé velikosti pracovního prostoru, avšak charakterizovat přesně, co znamená malá CNC frézka je komplikované. Rozdělení dle velikosti není určeno normou, a tak může každý výrobce nazývat malým zařízením diametrálně odlišná zařízení (velikost pracovního posuvu, výkony atd.). [2]

V následujících podkapitolách budou rozebrány nejčastěji využívané koncepce pro malé (modelářské) CNC frézky.

2.1 Stolní frézky

Stolní frézky jsou založeny na konstrukci frézek stolových, které jsou novějším typem frézovacích strojů, nahrazující v určité oblasti dříve používané konzolové frézky. V základní koncepční variantě této frézky se na loži pohybuje podélně a příčně pracovní stůl (tzv. křížový stůl). Dalšími variantami může být například výsuvný vřeteník nebo posuvný stojan frézky. V modelářském odvětví a u malých frézek je však nejčastěji využívána uvedená varianta s křížovým stolem. Svislý pohyb je vykonáván vřeteníkem, uloženým ve vedení stojanu. [2]



Obr. 1 Popis stolní frézky

2.2 Portálové frézky

Základním prvkem portálových frézek je portál, složený ze dvojice stojanů, které jsou v horní části spojeny příčnickem. Výška stolu je u této koncepce pevná. Za nevýhodu může být považován přesně definovaný pracovní prostor stroje (portálem). [1]

Portálové frézky jsou v modelářském odvětví často nazývány také jako routery a uživatelé je ve většině případů využívají především ke gravírování rovinných ploch (z toho plyne i používané pojmenování - gravírky).

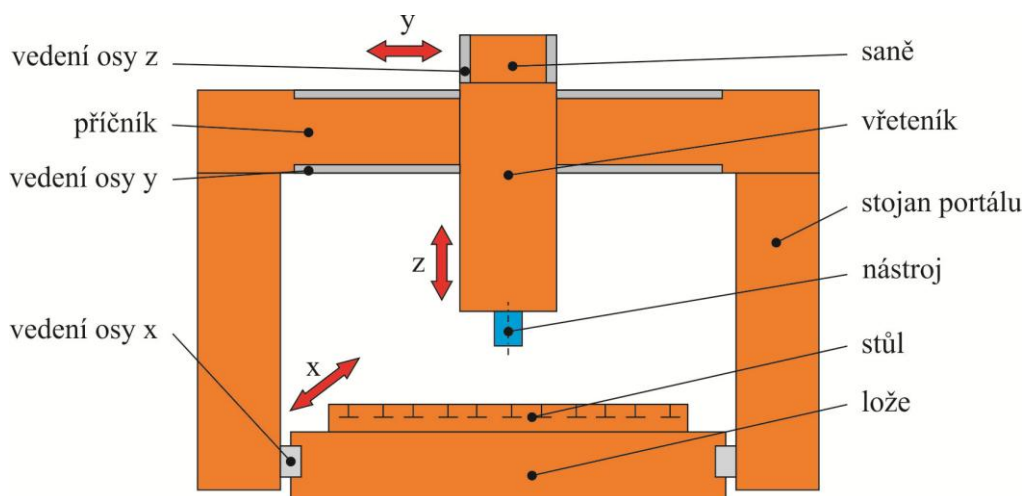


Obr. 2 Portálová frézka firmy Gravos [7]

2.2.1 Portálová frézka typu spodní gantry

Portálové frézky typu spodní gantry jsou vybaveny pojízdným portálem a pevným stolem. Využívají se především k obrábění tvarově složitých obrobků. [1]

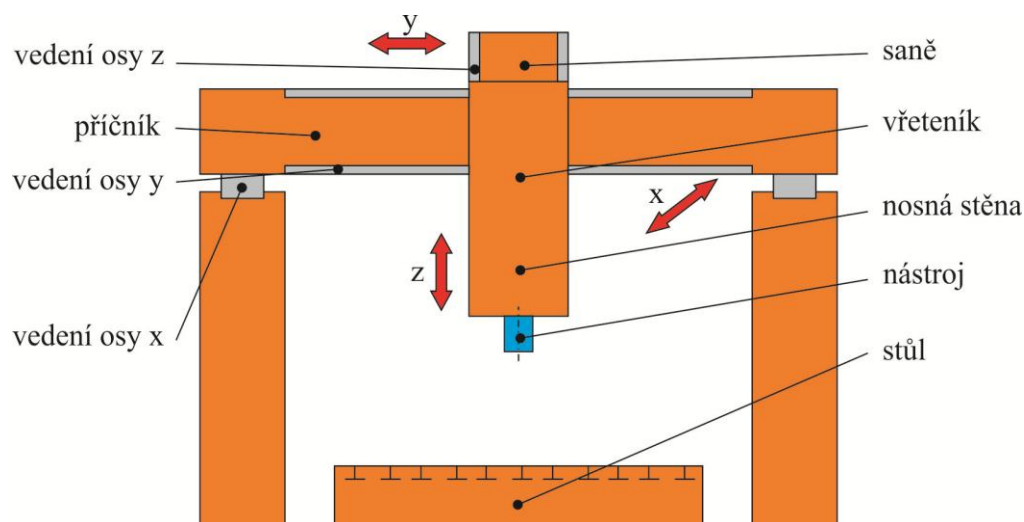
Koncepce typu spodní gantry je jednou z nejčastěji používaných koncepcí pro konstrukci modelářských frézek amatérskými modeláři.



Obr. 3 Popis frézky koncepce spodní gantry

2.2.2 Portálová frézka typu horní gantry

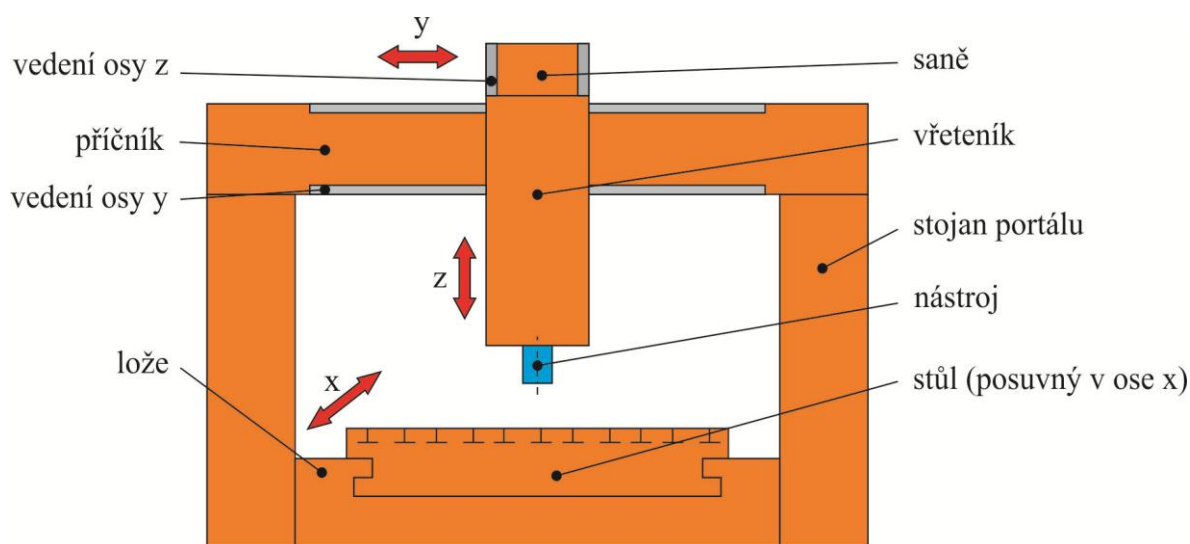
V případě této koncepce nevykonává pohyb celý portál (jako u koncepce spodní gantry), ale pouze příčník, který je uložen ve vedení na podélných stěnách. Uvedené řešení vykazuje lepší tuhost než koncepce spodní gantry a také lepší dynamiku stroje (z důvodu menší hmotnosti pohybujících se hmot). [1]



Obr. 4 Popis frézky koncepce horní gantry

2.2.3 Portálová frézka s pohyblivým stolem

U této koncepce je portál pevný a stůl je pohyblivý mezi stojany portálu. Uvedená varianta je vhodná na obrobky s nižší hmotností. [1]



Obr. 5 Popis frézky s pohyblivým stolem

3 MALÉ CNC FRÉZKY SOUČASNÉ PRODUKCE

V následující kapitole jsou pro názornost rozebrány vybrané typy modelářských CNC frézek, které jsou v současné době dostupné na trhu, ať již pro hobby, výrobní, či výukové využití.

3.1 Modelářské frézky firmy Merkur

Firma Merkur je tradiční českou firmou, která se zabývá výrobou hraček, vláček a učebních pomůcek. Do kategorie učebních pomůcek spadají i modelářské CNC frézky této firmy. Uvedené frézky jsou určeny především pro výukové a názorné ukázky obrábění dílů z hliníku, plastů, dřeva, nikoliv však k nepřetržitému provozu ve výrobě. Z tohoto určení vyplývají i použité komponenty stroje a nízká tuhost. [8]



Obr. 6 Logo firmy Merkur [8]

3.1.1 MC30FT

Jedná se o frézku portálové konstrukce. Frézka je vhodná zejména pro gravírování, výrobu přístrojových panelů, plošných spojů, frézování otvorů do krabiček atd. Osa Y a Z je uložena na předepnutém lineárním vedení s kuličkovými vozíky, osa X je uložena na kluzném vedení. Přenos pohybu z pohonů na osy stroje je realizován trapézovými šrouby. [8]



Obr. 7 Modelářská frézka MC30FT [8]

Tab. 1 Parametry stroje Merkur MC30FT [8]

Specifikace	Parametry
Řídicí systém	ARMOTE
Rozměry pracovního stolu	330 x 300 mm
T-drážky / počet	?
T-drážky / velikost drážky	?
T-drážky / rozteč	?
Rozsah posuvu - osa X	180 mm
Rozsah posuvu - osa Y	210 mm
Rozsah posuvu - osa Z	90 mm
Rychloposuv	300 mm.min ⁻¹
Otáčky	5000 - 20 000 ot/min
Kleština	?
Výkon vřetene	100 W
Opakovatelná přesnost	0,05 mm
Max. krouticí moment vřetene	?
Krouticí moment motoru - osa X	?
Krouticí moment motoru - osa Y	?
Krouticí moment motoru - osa Z	?
Elektrické připojení	24V / 5A DC
Rozměry	410 x 470 x 500 mm
Hmotnost	21 kg
Cena bez DPH	30 000 Kč

3.2 Modelářské frézky firmy BOW divize CNC strojů NUMCO

Společnost První hanácká BOW se od roku 1992 zabývá výrobou a prodejem tvářecích a obráběcích strojů. Tato firma se dále zabývá prodejem obráběcích strojů německé firmy Optimum Maschinen Germany GmbH, prodejem kompresorů pod značkou Aircraft, manipulační technikou pod značkou firmy Unicraft. Divizí firmy První hanácká BOW jsou CNC obráběcí stroje NUMCO, jejíž obráběcí stroje budou představeny v další části této práce. [9]



Obr. 8 Logo firmy První hanácká BOW [9]

3.2.1 Modelářská frézka NUMCO KX3

CNC frézka KX3 je určena pro výrobu součástí menších rozměrů z železných i neželezných kovů v modelářských dílnách, školních zařízeních a menších firmách. Tato frézka je stolní koncepce, na rozdíl od ostatních zařízení uvedených v této práci. Hlavními díly jsou odlitky, pohony všech os jsou realizovány kuličkovými šrouby. Ke stroji lze dokoupit příslušenství v podobě MPG ovladače, řízené čtvrté osy, senzoru pro měření výšky nástroje nebo pneumatickým upínání nástrojů. [9]



Obr. 9 Stolní frézka NUMCO KX3 [9]

Tab. 2 Parametry stroje NUMCO KX3 [9]

Specifikace	Parametry
Řídicí systém	ARMOTE
Rozměry pracovního stolu	550 x 160 mm
T-drážky / velikost drážky	12 mm
Kužel vřetene	MK3
Rozsah posuvu - osa X	280 mm
Rychloposuv - osa X	2000 mm.min ⁻¹
Rozsah posuvu - osa Y	120 mm
Rychloposuv - osa Y	2000 mm.min ⁻¹
Rozsah posuvu - osa Z	270 mm
Rychloposuv - osa Z	2000 mm.min ⁻¹
Otáčky	100 - 5000 ot/min
Kleština	?
Výkon vřetene	1000 W
Opakovatelná přesnost	0,02 mm
Max. krouticí moment vřetene	5,5 Nm
Krouticí moment motoru - osa X	4 Nm
Krouticí moment motoru - osa Y	4 Nm
Krouticí moment motoru - osa Z	6 Nm
Elektrické připojení	230 V
Rozměry	870 x 800 x 690 mm
Hmotnost	220 kg
Cena bez DPH	259 990 Kč

3.2.2 CNC router SHG 0404

CNC router SHG 0404 slouží především k obrábění neželezných kovů, plastů a dřeva. Své uplatnění nachází především v reklamním a nábytkářském průmyslu, ale i při výrobě měkkých vstřikovacích forem a elektrod. Stroj je vybaven krokovými motory, kluznými

tyčemi a lineárním vedením HIWIN, vysokootáčkovým tichým vřetenem HSD s upínáním nástrojů do kleštiny. Konstrukce stroje je vytvořena z odlitků. Výrobce dále nabízí možnost volby komponent (kuličkové šrouby a vedení firmy THK atd.). Zařízení je možno vybavit krokovými motory nebo servomotory, senzorem pro měření délky nástroje, vodou nebo vzduchem chlazeným vřetenem, vakuovým stolem nebo odsáváním. [9]



Obr. 10 CNC router NUMCO SHG 0404 [9]

Tab. 3 Parametry stroje NUMCO SHG 0404 [9]

Specifikace	Parametry
Řídicí systém	ARMOTE
Rozměry pracovního stolu	520x660 mm
T-drážky / velikost drážky	?
Rozsah posuvu - osa X	400 mm
Rychloposuv - osa X	6000 mm.min ⁻¹
Rozsah posuvu - osa Y	400 mm
Rychloposuv - osa Y	4000 mm.min ⁻¹
Rozsah posuvu - osa Z	100 mm
Rychloposuv - osa Z	6000 mm.min ⁻¹
Otáčky	0-24000 ot/min
Kleština	ER16
Výkon vřetene	1500 W
Opakovatelná přesnost	0,02 mm
Max. krouticí moment motoru	?
Krouticí moment motoru - osa X	?
Krouticí moment motoru - osa Y	?
Krouticí moment motoru - osa Z	?
Elektrické připojení	230 V
Rozměry	910 x 800 x 880 mm
Hmotnost	80 kg
Cena bez DPH	209 990 Kč

3.3 CNC zařízení firmy CNC Konečný

Firma CNC Konečný je českou firmou, která se zabývá zakázkovou výrobou obráběcích strojů. Stroje této produkce se vyznačují masivní ocelovou konstrukcí s vysokou tuhostí. Vyráběná zařízení se využívají v mnoha odvětvích, jako například v modelářství, v reklamní výrobě, obalovém průmyslu atd. [10]



Obr. 11 Logo firmy CNC Konečný [10]

3.3.1 CNC router řady RM SX

Uvedený CNC router má pohon všech os realizován pomocí kuličkových šroubů, lineární kuličkové vedení je použito od firmy HIWIN. Zařízení je rovněž možno osadit množstvím volitelného příslušenství. [10]



Obr. 12 CNC router řady RM SX [10]

Tab. 4 Parametry routeru řady RM SX [10]

Specifikace	Parametry
Řídicí systém	Comets
Rozměry pracovního stolu	do 700 x 500 mm
T-drážky / velikost drážky	?
Rozsah posuvu - osa X	700 mm
Rozsah posuvu - osa Y	500 mm
Rozsah posuvu - osa Z	160 mm
Rychloposuv	5000 mm.min ⁻¹
Otáčky	5000 - 20 000 ot/min
Kleština	ER25
Výkon vřetene	750 W
Opakovatelná přesnost	?
Max. krouticí moment vřetene	?
Krouticí moment motoru - osa X	?
Krouticí moment motoru - osa Y	?
Krouticí moment motoru - osa Z	?
Elektrické připojení	230 V
Rozměry	?
Hmotnost	do 100 kg
Cena bez DPH	205 000 Kč

3.4 CNC frézka TRON

Jedná se o hobby stavebnici frézky německého autora Jense Niemeyera, který uvedené zařízení postavil v roce 2006. V roce 2008 prošla konstrukce modifikací a nese název Tron+. Ten má zvětšenou pracovní plochu a upravené některé díly při zachování původní koncepce. Na webu tohoto autora (<http://www.tron-cnc.de/>) je možno zakoupit plány pro výrobu Trona+. Cena licence je 36 euro a jejím zakoupením získá uživatel plány na plechové, hliníkové díly a trapézové šrouby. V těchto plánech není řešen pohon, motory, jejich zapojení ani řízení. [11]



Obr. 13 CNC frézka TRON+ [12]

Tab. 5 Parametry stroje TRON+ [11]

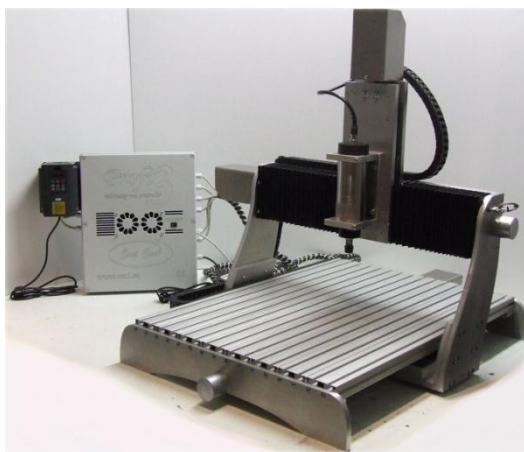
Specifikace	Parametry
Řídicí systém	dle vlastního výběru
Rozměry pracovního stolu	980 x 480 mm
T-drážky / velikost drážky	?
Rozsah posuvu - osa X	?
Rozsah posuvu - osa Y	?
Rozsah posuvu - osa Z	90 mm
Rychloposuv	?
Otáčky	?
Kleština	?
Výkon vřetene	dle vlastního výběru
Opakovatelná přesnost	?
Max. krouticí moment vřetene	?
Krouticí moment motoru - osa X	?
Krouticí moment motoru - osa Y	?
Krouticí moment motoru - osa Z	?
Elektrické připojení	230 V
Rozměry	?
Hmotnost	?
Cena bez DPH	cca 40 000 Kč (bez SW)

3.5 CNC zařízení firmy Cau Cau

Firma Cau Cau je slovenskou firmou, která se zabývá CNC gravírováním a obráběním 15 let. Portfoliem firmy jsou CNC frézky, CNC routery, CNC soustruhy. Firma vyrábí CNC routery od malých rozměrů (cca 450x550x600 mm) až po větší (cca 3000x1700x1700 mm) rozměry. Výrobce se zabývá hobby stroji (malé hobby 3D CNC frézky), ale i stroji, které nalézají využití v průmyslové velkovýrobě. [13]

3.5.1 3D CNC frézka Kompas F-600

Frézka Kompas F-600 je vhodná na gravírování a frézování plastů, dřeva, hliníku, mosazi. Využití nalézá v modelářských dílnách, malých provozech. Dle výrobce je předurčena i k obrábění kovových materiálů, ač tato informace je diskutabilní a výsledná produktivita bude na velmi nízkých hodnotách. Všechny osy jsou osazeny kuličkovými šrouby, vedení je použito lineární HGR20. [13]



Obr. 14 3D CNC frézka Kompas F-600 [13]

Tab. 6 Parametry stroje Kompas F-600 [13]

Specifikace	Parametry
Řídicí systém	Mach 3 demo verze
Rozměry pracovního stolu	650 x 450 mm
T-drážky / velikost drážky	?
Rozsah posuvu - osa X	400 mm
Rozsah posuvu - osa Y	600 mm
Rozsah posuvu - osa Z	100 mm
Rychloposuv	2800 mm.min ⁻¹
Otáčky	max 24 000 ot/min
Kleština	?
Výkon vřetene	2200 W
Opakovatelná přesnost	0,01 mm
Max. krouticí moment vřetene	?
Krouticí moment motoru - osa X	?
Krouticí moment motoru - osa Y	?
Krouticí moment motoru - osa Z	?
Elektrické připojení	230 V
Rozměry	800 x 700 x 600 mm
Hmotnost	cca 80 kg
Cena bez DPH	2 900 €

3.6 CNC frézky firmy GRAVOS

Firma GRAVOS vznikla v roce 1992 a zabývá se výrobou a prodejem 3-osých CNC frézek včetně řízení, programového vybavení a příslušenství. Další aktivitou firmy je vývoj vlastní elektroniky, řídicích systémů a software CAD/CAM pro CNC frézky. [7]

3.6.1 3D CNC router IK 500

Uvedený stroj disponuje dle výrobce velkou pracovní plochou za rozumné pořizovací náklady s minimální údržbou a snadnou obsluhou. Zařízení je možno doplnit o další příslušenství, jako je například vakuový upínací stůl nebo odsávání třísek. Všechny pohony os jsou řešeny kuličkovými šrouby a lineárním vedením. Krokový motor osy Z je vybaven elektro-magnetickou brzdou proti sjíždění osy ve vypnutém stavu. [7]



Obr. 15 3D CNC router Gravos IK 500 [7]

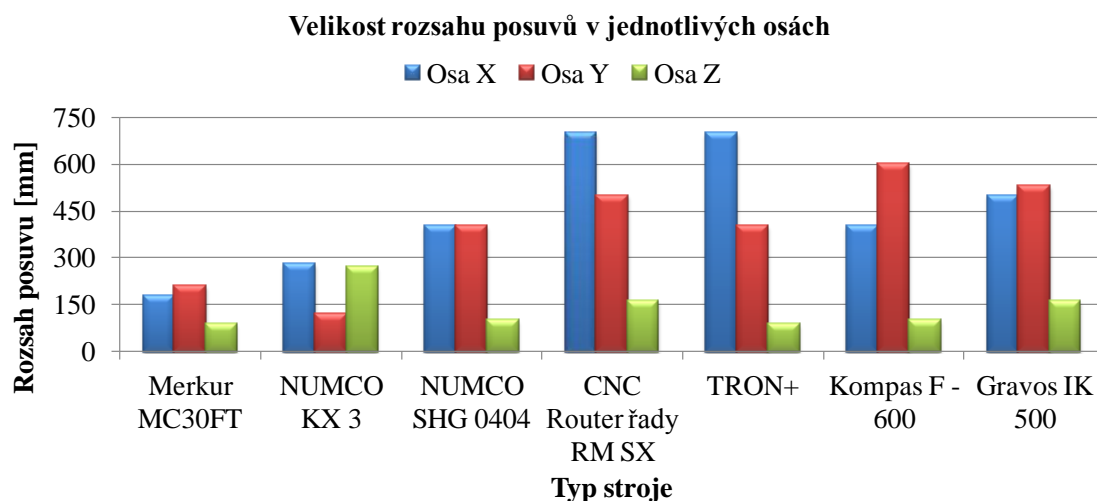
Tab. 7 Parametry stroje Gravos IK 500 [7]

Specifikace	Parametry
Řídicí systém	REMOTE
Rozměry pracovního stolu	850 x 750 mm
T-drážky / velikost drážky	6 mm
Rozsah posuvu - osa X	500 mm
Rozsah posuvu - osa Y	530 mm
Rozsah posuvu - osa Z	160 mm
Rychloposuv	6000 mm.min ⁻¹
Otáčky	1000-24000 ot/min
Kleština	ER 16
Výkon vřetene	750 W
Opakovatelná přesnost	0,01 mm
Max. kroutící moment vřetene	?
Kroutící moment motoru - osa X	1,6 Nm
Kroutící moment motoru - osa Y	1,6 Nm
Kroutící moment motoru - osa Z	1,6 Nm
Elektrické připojení	230 V
Rozměry	1040 x 1100 x 940 mm
Hmotnost	90 kg
Cena bez DPH	?

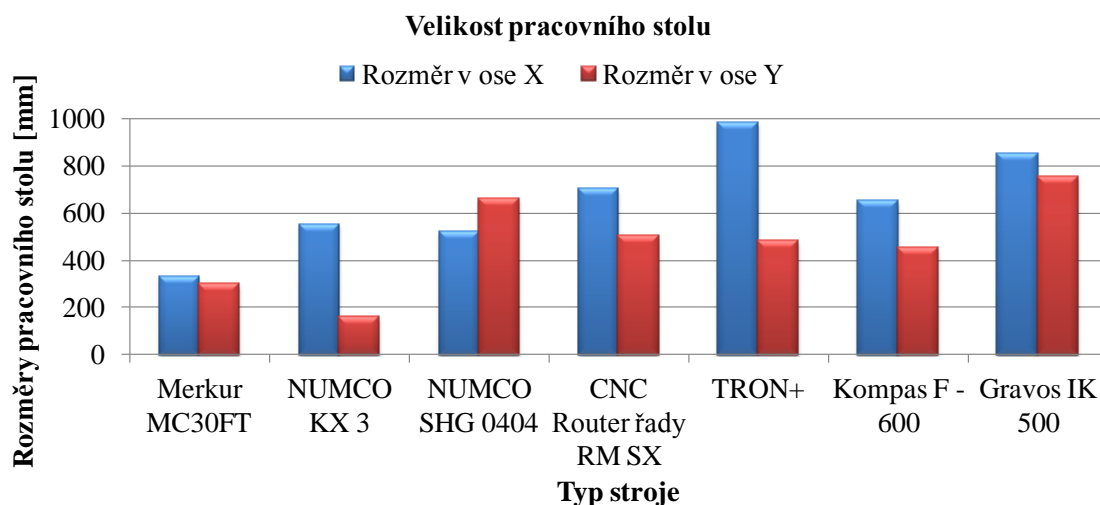
4 CELKOVÉ POROVNÁNÍ MALÝCH CNC FRÉZEK

V této kapitole budou porovnány parametry malých CNC frézek/routerů uvedených v předchozí kapitole. Ke srovnání lze použít mnoho parametrů, ze kterých budou vybrány parametry týkající se velikosti posuvů, velikosti pracovního stolu, velikosti rychloposuvu, výkonu včetně a elektrického připojení stroje. Na základě srovnání uvedených parametrů však nelze jednoznačně říct, který stroj je lepší nebo horší, jelikož vždy záleží na požadavcích kladených na stroj a také na jeho využití, ať již výrobním podnikem nebo hobby modelářem.

Jako první parametr jsou ve sloupcovém grafu viz Obr. 16 srovnány velikosti rozsahů posuvů jednotlivých strojů. Tento parametr se odvíjí od velikosti pracovního stolu, který je srovnán v grafu na Obr. 17. Rozsahy posuvů a velikost pracovního stolu ovlivňují maximální možnou velikost obráběného polotovaru. Z grafů je patrné, že největší rozsah posuvu v ose X má CNC router řady RM SX od firmy Konečný a hobby frézka Tron+. Největším rozsahem posuvu v ose Y disponuje router Kompas F-600 od firmy Cau Cau. Největší rozsah posuvu v ose Z má frézka Numco KX 3, u níž je to patrné vzhledem k její koncepci.

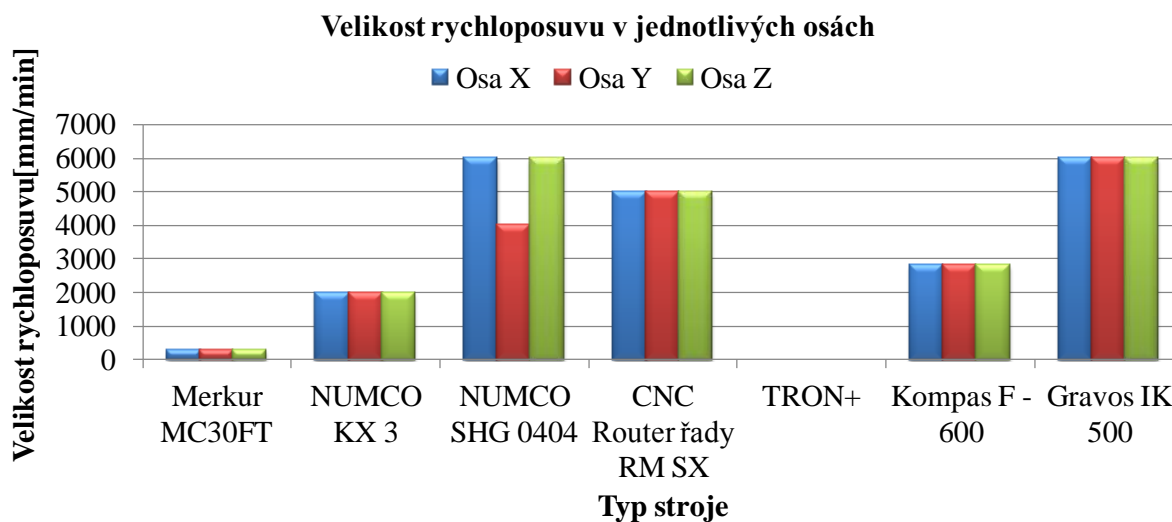


Obr. 16 Porovnání velikosti rozsahu posuvů vybraných strojů



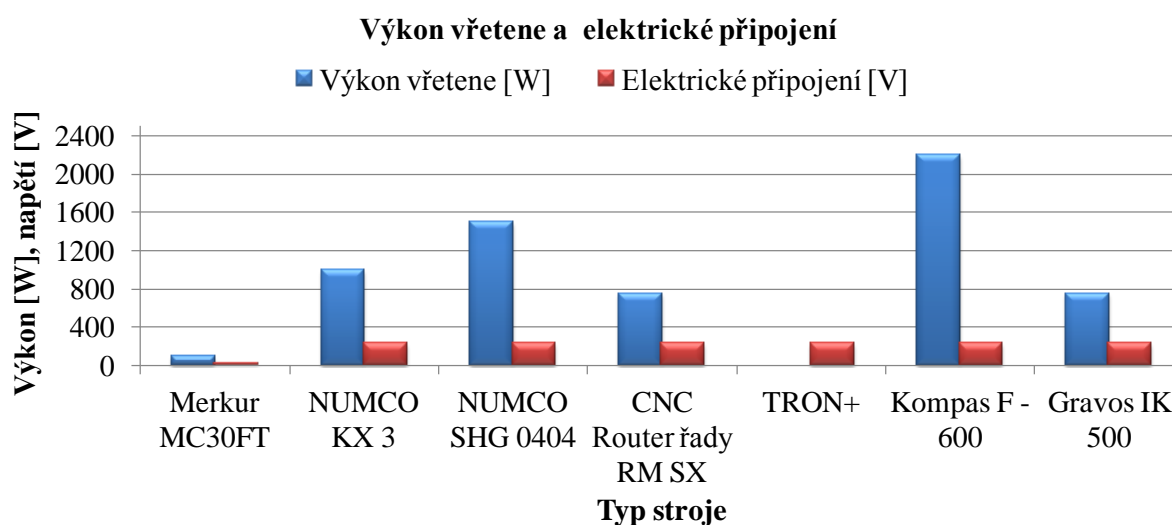
Obr. 17 Porovnání velikostí pracovních stolů u vybraných strojů

Dalším parametrem, který je vhodné porovnat je velikost rychloposuvů. Tato hodnota ovlivňuje velikost vedlejších časů při obrábění, a tím ovlivňuje produktivitu výroby. Z grafu (Obr. 18) je patrné, že největší hodnotou rychloposuvu disponuje router od firmy Gravos - IK 500. Nejnižší hodnoty naopak dosahuje frézka MC30FT od firmy Merkur. U frézky Tron+ nelze hodnotu uvést, jelikož závisí na použitých komponentách, které si zvolí při stavbě stroje uživatel.



Obr. 18 Porovnání velikostí rychloposuvů vybraných strojů

V posledním grafu (Obr. 19) jsou stroje porovnány z hlediska připojení k síti a výkonu vřetena. Připojení k síti je u všech zařízení na 230V, pouze u frézky MC30FT od firmy Merkur je připojení k síti na 24V. Nejvýkonnějším vřetenem ze srovnávaných strojů (2200W) je vybavena frézka Kompas F-600 od společnosti Cau Cau. Naopak nejnižší výkon vřetena má frézka MC30FT od výrobce Merkur, jehož hodnota je pouze 100W. U zařízení TRON+ výkon vřetena opět nelze uvést, jelikož jeho hodnota plně závisí na uživatelské volbě vřetena.



Obr. 19 Porovnání výkonů vřetene a elektrického připojení vybraných strojů

Z uvedeného srovnání je jednoznačně patrné, že nejslabším strojem z porovnávaných je frézka MC30FT od firmy Merkur. Tento fakt byl předpokladatelný, jelikož se jedná především o výukový stroj. S nasazením ve výrobě se s tímto strojem počítat nesmí. Stroj má nejmenší výkon vřetene, nízkou tuhost, pomalé rychloposuvy, ale taky nejnížší cenu ze všech jmenovaných strojů, a to 30 000 Kč. Jak je patrné z grafů, některá zařízení mají lepší parametry např. ve výkonech vřetene, velikosti rychloposuvu atd., avšak nelze jednoznačně říct, které zařízení je nejlepší. Jak již bylo zmíněno, vždy záleží na požadavcích zákazníka, jaký stroj je pro něj a jeho využití neoptimálnější. Pokud by zákazník vyžadoval vysoký výkon vřetene, byl by pro něj vhodnou volbou stroj Kompas F-600 od slovenského výrobce Cau Cau. Poměrně vyvážené parametry nabízí router IK 500 od firmy Gravos. Ten disponuje dostatečně velkou rychlostí rychloposuvu, dobrou velikostí rozsahů jednotlivých os, kdy hodnotu rozsahu osy Z má mezi routery společně se zařízením RM SX od výrobce Konečný z uvedených zařízení největší. Slabinou tohoto zařízení je ovšem vřeteno, které poskytuje výkon pouze 750 W.

5 KONSTRUKCE MODELÁŘSKÉ FRÉZKY

Konstrukce malé CNC modelářské frézky bude vycházet z výrobních strojů běžné velikosti. Cílem konstrukce je sestavit frézku, která bude schopna obrábět dřevo, plast, ale především slévarenskou slitinu hliníku AlSi, kdy obsah Si je větší než 13%. Jedná se o jednu z nejtvrdších hliníkových slitin, z tohoto důvodu musí být stroj dostatečně dimenzován a vykazovat dostatečnou tuhost pro dané obrábění. Frézka by měla nalézt uplatnění v modelářských dílnách, ale i výrobních podnicích pro obrábění materiálů, pro které je navržena. Tím by umožnila zefektivnit výrobu na velkých výrobních zařízeních, které by nebyly vytíženy obráběním malých obrobků. Cena navrženého stroje nebude nejnižší, avšak je nutno zohlednit, že pro produktivní obrábění slitin hliníku je nutno konstruovat robustní stroj, který splní požadované zadání. Model frézky bude následně vytvořen v softwaru Autodesk Inventor 2015 Professional.

5.1 Volba technických parametrů pro návrh frézky

Konstruovaná frézka by měla být schopna zvládat drážkové frézování hliníkové slitiny AlSi s obsahem Si větším než 13%, a to až do hloubky řezu 5 mm, frézou o průměru 10 mm. Dále by měl stroj zvládat vrtání do průměru 6 mm. Dalšími kritérii jsou obrábění plastu a dřeva, z čehož plyne nutnost použít vřeteno, které bude mít dostatečné rozpětí otáček pro frézování uvedených materiálů, ale musí také vynikat dostatečným kroutícím momentem, pro dosažení požadovaných řezných podmínek při frézování hliníkové slitiny. Rychloposuv zařízení by měl dosahovat hodnoty 4800 mm/min, z důvodu minimalizace vedlejších časů při obrábění. Tato hodnota není nejvyšší a v současné době jsou stroje schopny dosahovat značně vyšších rychlostí, avšak pro daný účel je tato rychlost dostatečná. Rychlost u osy z bude nižší z důvodu menšího zdvihu osy. Stroj by měl být konstruován z maximálního množství standardizovaných dílů, avšak ne vždy je možno tohoto požadavku, především z konstrukčních důvodů, dosáhnout. Stroj bude v základu vybaven řídicím systémem, který je možno zaměnit za jiný, dle výběru koncového zákazníka. Frézka by měla dále dosahovat opakovatelné přesnosti 0,02 mm. Základní parametry, ze kterých bude vycházeno při konstrukci stroje jsou zobrazeny v Tab. 8. Další parametry (výkon vřetene, krokové motory pro jednotlivé osy, vedení jednotlivých os atd.) budou doplňovány v průběhu konstrukčního návrhu z konstrukčních výpočtů.

Tab. 8 Navržené parametry pro konstrukci stroje

Specifikace	Parametry
Řídicí systém	Mach 3
Rozměry pracovního stolu	860 x 640 mm
Max. průměr stopkové frézy	10 mm
Rozsah posuvu - osa X	700 mm
Rychloposuv osy X,Y	4800 mm.min ⁻¹
Rozsah posuvu - osa Y	450 mm
Rozsah posuvu - osa Z	200 mm
Rychloposuv osy Z	3000 mm.min ⁻¹
Opakovatelná přesnost	0,02 mm
Elektrické připojení	230 V

Tab. 9 Technologické operace prováděné na stroji

Obráběný materiál	Druh obrábění	Parametry obrábění
Slitina AlSi, Si>13%	Drážkové frézování	max. šířka 10 mm, max. hloubka 5 mm
Slitina AlSi, Si>13%	Vrtání	max. průměr 6 mm

5.2 Výpočet řezných parametrů a sil při obrábění

V následující kapitole budou vypočteny řezné parametry, které vznikají při frézování a vrtání uvedené AlSi slitiny. Z vypočtených parametrů bude dále voleno potřebné vřeteno a celková konstrukce stroje.

Pro výpočet těchto parametrů je nutné zvolit vhodný nástroj, kterým budou dané operace provedeny. Nástroje pro vrtání a frézování jsou voleny od firmy Pramet Tools s.r.o., která veškeré své nástroje vyrábí v závodu Šumperk, Česká republika. Firma dodává dostatečný sortiment nástrojů pro široké spektrum obráběných materiálů. Výrobce dále uvádí technologické parametry pro obrábění, které je vybraný nástroj schopen dosáhnout. [14]

5.2.1 Frézování

Pro frézování je volena monolitní fréza PRAMET 10E2S70-22A10 NEPU. Uvedený nástroj je určen především k obrábění hliníkových slitin s obsahem křemíku větším než 10%. Parametry nástroje jsou uvedeny v Tab. 10. Parametry obráběného materiálu jsou uvedeny v Tab. 11. [14]



Obr. 20 Monolitní fréza PRAMET E2S NEPU [14]

Tab. 10 Parametry pro drážkové frézování frézou PRAMET 10E2S70-22A10 NEPU [14]

Název	Hodnota
Průměr nástroje	$D_{Nf} = 10 \text{ mm}$
Počet zubů	$Z_{Nf} = 2$
Posuv na zub	$f_z = 0.031 \text{ mm/zub}$
Řezná rychlost	$v_{cf} = 200 \text{ m/min}$
Hloubka záběru	$a_p = 5 \text{ mm}$
Šířka záběru	$a_e = 10 \text{ mm}$
Nástrojový ortogonální úhel čela	$\gamma_o = 15^\circ$
Nástrojový úhel nastavení ostří	$\kappa_r = 90^\circ$

Tab. 11 Materiálové konstanty obráběného materiálu [15]

Název	Hodnota
Tvrdost materiálu	$T_v = 130 \text{ HB}$
Měrná řezná síla	$k_{c1} = 700 \text{ MPa}$
Nárůst měrné řezné síly	$m_c = 0.25$

Výpočet řezných podmínek je proveden s podporou literatury [5], [15]

Potřebné otáčky nástroje při frézování:

$$n_f = \frac{v_{cf} \cdot 1000}{\pi \cdot D_{Nf}} = \frac{200 \cdot 1000}{\pi \cdot 10} = 6366 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (1)$$

Rychlost posuvu při frézování:

$$v_f = n_f \cdot Z_{Nf} \cdot f_z = 6366 \cdot 2 \cdot 0,031 = 395 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \quad (2)$$

Střední tloušťka třísky při frézování:

$$h_m = \frac{f_z \cdot \sin(\kappa_r) \cdot 180 \cdot a_e}{\pi \cdot D_{Nf} \cdot \arcsin\left(\frac{a_e}{D_{Nf}}\right)} = \frac{0,031 \cdot \sin(90) \cdot 180 \cdot 10}{\pi \cdot 10 \cdot \arcsin\left(\frac{10}{10}\right)} = 0,0197 \text{ mm} \quad (3)$$

Měrná řezná síla při frézování:

$$k_{cf} = k_{c1} \cdot h_m^{-m} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_o}{100}\right) = 700 \cdot 0,0197^{-0,25} \cdot \left(1 - \frac{15}{100}\right) = 1588 \text{ MPa} \quad (4)$$

Potřebný výkon vřetena při frézování:

$$P_f = \frac{v_f \cdot a_p \cdot a_e \cdot k_{cf}}{6 \cdot 10^4} = \frac{395 \cdot 4,5 \cdot 10 \cdot 1588}{6 \cdot 10^4} = 470 \text{ W} \quad (5)$$

Řezná síla při frézování:

$$F_{cf} = k_{cf} \cdot a_p \cdot f_z = 1588 \cdot 4,5 \cdot 0,031 = 222 \text{ N} \quad (6)$$

Krouticí moment na nástroji při frézování:

$$M_{kf} = F_{cf} \cdot \frac{D_{Nf}}{2 \cdot 1000} = 1,11 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (7)$$

5.2.2 Vrtání

Pro vrtání je volen monolitní vrták od stejnojmenné firmy jako u frézování, a to vrták PRAMET 303DA-M (viz. Obr. 21) o průměru 6 mm. Parametry nástroje jsou uvedeny v Tab. 12. Obráběný materiál je uvažován stejný jako u frézování (Tab. 11). [14]



Obr. 21 Vrták PRAMET 303DA-M [14]

Výrobce stanoví posuv na otáčku je $0,25 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$, avšak tato hodnota je pro konstruovanou velikost stroje příliš velká a stroj by nebyl tohoto parametru schopen dosáhnout. Z tohoto důvodu je tato hodnota snížena na hodnotu $0,1 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$. Uvedené omezení je nutné zmínit v příručce dodávané se strojem.

Tab. 12 Parametry pro vrtání vrtákem PRAMET 303DA-M o průměru 6 mm [14]

Název	Hodnota
Průměr nástroje	$D_{Nv} = 6 \text{ mm}$
Počet zubů	$Z_{Nv} = 2$
Posuv na otáčku	$f_o = 0,1 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$
Rezná rychlost	$v_{cv} = 205 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
Nástrojový ortogonální úhel čela	$\gamma = 30^\circ$
Nástrojový úhel nastavení ostří	$\kappa_r = 70^\circ$

Výpočet řezných podmínek při vrtání je proveden s podporou [5], [15].

Potřebné otáčky nástroje při vrtání:

$$n_v = \frac{v_{cv} \cdot 1000}{\pi \cdot D_{Nv}} = \frac{205 \cdot 1000}{\pi \cdot 6} = 10876 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (8)$$

Posuv na zub při vrtání:

$$f_{zv} = \frac{f_o}{Z_{Nv}} = \frac{0,1}{2} = 0,05 \text{ mm} \cdot \text{zub}^{-1} \quad (9)$$

Měrná řezná síla při vrtání:

$$k_{cv} = k_{c1} \cdot (f_{zv} \cdot \sin \kappa_r)^{-m_c} \cdot \left(1 - \frac{\gamma}{100}\right) = 700 \cdot (0,05 \cdot \sin 70)^{-0,25} \cdot \left(1 - \frac{30}{100}\right) = 1052 \text{ MPa} \quad (10)$$

Potřebný výkon vřetena při vrtání:

$$P_v = \frac{f_{zv} \cdot v_{cv} \cdot D_{Nv} \cdot k_{cv}}{240} = \frac{0,05 \cdot 205 \cdot 6 \cdot 1052}{240} = 270 \text{ W} \quad (11)$$

Krouticí moment na nástroji při vrtání:

$$M_{Kv} = \frac{P_v \cdot 30}{\pi \cdot n_v} = \frac{270 \cdot 30}{\pi \cdot 10876} = 0,24 \text{ Nm} \quad (12)$$

Rychlost posuvu při vrtání:

$$v_{fv} = f_o \cdot n_v = 0,1 \cdot 10876 = 1087,6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \quad (13)$$

Síla posuvu při vrtání:

$$F_f = 0,5 \cdot k_{cv} \cdot \frac{D_{Nv}}{2} \cdot f_o \cdot \sin \kappa_r = 0,5 \cdot 1052 \cdot \frac{6}{2} \cdot 0,1 \cdot \sin 90 = 158 \text{ N} \quad (14)$$

Tloušťka třísky při vrtání:

$$h_D = f_z \cdot \sin \kappa_r = 0,05 \cdot \sin 70 = 0,05 \text{ mm} \quad (15)$$

Šířka třísky při vrtání:

$$b_D = \frac{D_{Nv}}{2 \cdot \sin \kappa_r} = \frac{6}{2 \cdot \sin 70} = 3,19 \text{ mm} \quad (16)$$

Průřez třísky při vrtání:

$$A_D = h_D \cdot b_D = 0,05 \cdot 3,19 = 0,16 \text{ mm}^2 \quad (17)$$

Řezná síla při vrtání:

$$F_{Cv} = k_{Cv} \cdot A_D = 1052 \cdot 0,16 = 168 \text{ N} \quad (18)$$

5.3 Volba vřetene

Dle vypočtených parametrů pro frézování a vrtání je nutno zvolit pro stroj vhodné vřeteno. Při volbě vřetena je vycházeno z řezných podmínek pro frézování, jelikož tyto podmínky kladou na vřeteno vyšší nároky než řezné podmínky vznikající při vrtání.

V současné době se na trhu nabízí poměrně široký sortiment frézovacích vřeten, od malých výkonů až po vyšší. Tato práce se bude zabývat vřeteny renomovaných výrobců, která jsou snadno dostupná v České republice. Z výrobců vřeten se jedná především o vřetena německé firmy KRESS-elektrik GmbH & Co. KG a italské firmy TeknoMotor. Tato vřetena jsou snadno dostupná i v České republice. Další variantou mohou být vřetena málo známých čínských firem, které však mají nulovou záruku a servis a dle zkušeností uživatelů také výrazně nižší životnost. Z tohoto důvodu nejsou tyto vřetena do volby zahrnuty. [16]

Vřetena KRESS jsou vyráběny ve výkonových verzích 1050 W a 800 W. Tato vřetena jsou vhodná zejména pro obrábění dřeva a plastů, pro produktivní obrábění hliníkových slitin nemají dostatečný výkon. [16]



Obr. 22 Vřeteno KRESS FME 1050-1 [16]

Vřetena TeknoMotor jsou taktéž vyráběna v širokém výkonovém spektru. Po důkladné analýze je pro CNC frézku konstruovanou v této práci zvoleno vřeteno od této firmy

s označením C41/47-C-DB-P-ER25. Jedná se o profesionální vyvážené vřeteno pro radiální i axiální zatížení. Součástí dodávky vřetene je vyvažovaná matice. Parametry vřetena jsou uvedeny v Tab. 13. [16]

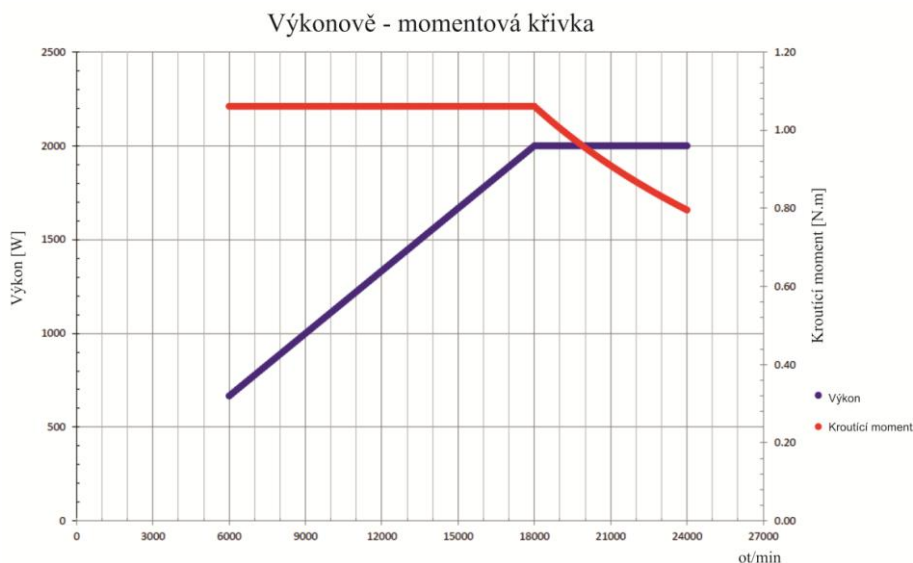


Obr. 23 Vřeteno TeknoMotor C41/47-C-DB-P-ER25 [16]

Tab. 13 Parametry vřetena TeknoMotor C41/47-C-DB-P-ER25 [17]

Parametr vřetene	Hodnota
Výkon	2000 W
Použitelný rozsah otáček	6000 - 24000 ot.min ⁻¹
Čelní ložisko	dvojitě kosohlé
Kleštinový upínač	ER 25
Chlazení	vzduch

Při požadovaných frézovacích operacích bude vřeteno pracovat při 6366 ot.min⁻¹, proto je nutné z výkonově-momentové charakteristiky (Obr. 24) ověřit, zda bude vřeteno při uvedených otáčkách schopno dosahovat požadovaného výkonu a krouticího momentu. Výrobce doporučuje minimální pracovní otáčky jsou 6000 ot.min⁻¹ z důvodu chlazení vzduchem. Pro požadovanou aplikaci tento parametr vyhovuje, ale v případě potřeby nižších otáček by bylo nutno vyřešit chlazení vřetene kapalinou.



Obr. 24 Výkonově - momentová křivka vřetena TeknoMotor C41/47-C-DB-P-ER25 [17]

Dále je pro zvolené vřeteno nutno vybrat vhodný frekvenční měnič. Pro navržené vřeteno je dle doporučení prodejce vřeten volen frekvenční měnič VFD022EL21A od výrobce Delta Electronics o výstupním výkonu 2,2 kW. Frekvenční měnič je dále vybaven ovládacím panelem, vestavěnou PID regulací a EMI filtrem. Výstupní frekvence měniče je 0,1 ~ 600 Hz. Uvedený frekvenční měnič je pro zvolené vřeteno dostatečně dimenzován. [16]



Obr. 25 Frekvenční měnič Delta Electronics VFD022EL21A [16]

5.4 Varianty řešení lineární posuvové soustavy

Posuvová soustava u konstruované frézky slouží k převodu rotačního pohybu motoru na přímočarý pohyb (osy Z, osy Y a osy X).

Posuvovou soustavu lze pro dané použití řešit pomocí trapézového nebo kuličkového šroubu s maticí, použití ozubeného hřebene a pastorku v dané aplikaci není vhodné použít.

Základní sestava kuličkového šroubu se skládá ze šroubu poháněného motorem, matice a zařízení zajišťujícího oběh kuliček. K hlavním přednostem patří vysoká účinnost, možnost úplného odstranění vůle a možnost vytvoření předpětí (vysoká tuhost a přesnost), minimální oteplování během provozu a malé opotřebení, tím je způsobena vysoká životnost a potlačení vzniku trhavých pohybů. Nevýhodou tohoto řešení je nesamosvornost a lze za ni považovat i vyšší cenu. [1]

Trapézový šroub vyniká oproti kuličkovému šroubu s maticí nižší cenou a samosvorností, nabízí však poměrně mnoho záporných vlastností. Jednou z nich je větší tření, z čehož plyne i nižší účinnost pohonu a vyšší nároky na pohon. Další nevýhodou je tzv. „mrtvý chod“ trapézového šroubu, který se v tomto mechanismu vyskytuje téměř vždy. Při frézování na stroji s použitým trapézovým šroubem může dojít k „poskoku“ osy, způsobeném zmíněným mrtvým chodem šroubu, proto se na strojích s touto posuvovou soustavou frézuje nesousledně (neblahý vliv na nástroj) a sousledně se provádí pouze dokončování z důvodu kvality povrchu. [21]

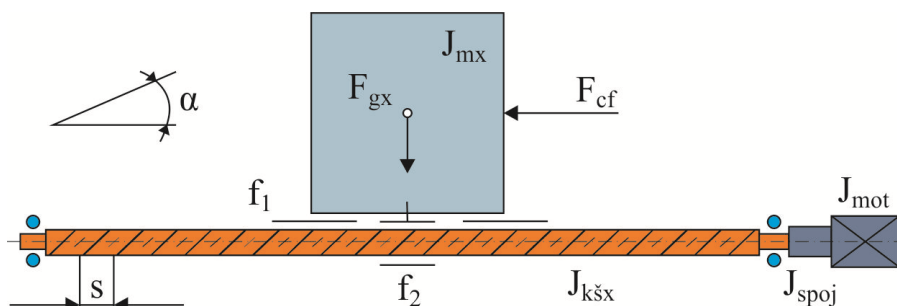
Z uvedených důvodů je pro konstrukci malé modelářské CNC frézky po analýze variant voleno řešení s použitím kuličkových šroubů s maticí pro všechny osy. Vlivem nesamosvornosti kuličkového šroubu je však nutné vybavit osu z brzdou, která zabrání sjetí vřetene do pracovního prostoru při přerušení dodávky elektrického proudu.

5.4.1 Návrh pohonu osy X

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, pro pohon osy X je voleno řešení s kuličkovým šroubem a maticí. Kuličkový šroub je volen okružovaný s velikostí vnějšího průměru 16 mm a velikostí stoupání 5 mm od výrobce HIWIN. Matice je volena dvojité předepnutá přírubová od stejnojmenného výrobce. Označení je DDB1605-R-3EF. Uvedeným řešením je dosaženo dostatečné tuhosti a minimální vůle pohonu osy. Šrouby budou uloženy u motorů radiálně i axiálně nepohyblivě, na druhém konci budou uloženy pouze radiálně nepohyblivě, axiální vůle je dovolena z důvodu tepelných dilatací. Šrouby budou uloženy v ložiskových domečkách BF-12 (axiálně pohyblivý konec) a FK-12 (axiálně i radiálně nepohyblivý konec), domečky dodává taktéž firma HIWIN. Domeček matice je z konstrukčních důvodů (rozměrových) vlastní výroby. Opracování konců kuličkových šroubů je standardní dle doporučení výrobce. [19]

Osa X bude poháněna dvěma motory a dvěma kuličkovými šrouby. Tento fakt bude zohledněn ve výpočtu, kdy bude počítáno s poloviční hmotností příčnicku bez osy z (saně s vřetenem), protože se rovnoměrně rozloží mezi dva použité motory. Hmotnost osy z bude zahrnuta v celé míře, jelikož její rozložení záleží na její aktuální pozici při obrábění. Hmotnosti byly zjištěny dle softwaru Autodesk Inventor.

Parametry vstupující do výpočtu pohonu jsou shrnuty v Tab. 14.



Obr. 26 Výpočtový model posuvové souřadnice X

Tab. 14 Parametry pro návrh posuvové soustavy X

Název	Hodnota
Jmenovitý průměr kuličkového šroubu	$d_{0s} = 0,016 \text{ m}$
Malý průměr závitu kuličkového šroubu	$d_k = 0,0135 \text{ m}$
Stoupání kuličkového šroubu	$s = 0,005 \text{ m}$
Statická tuhost KŠM	$C_0 = 12700 \text{ N}$
Dynamická tuhost KŠM	$C_{dyn} = 9600 \text{ N}$
Koeficient v závislosti na uložení pro otáčky	$k_d = 1,88$
Koeficient v závislosti na uložení pro vzpěr	$k_k = 2,05$
Úhel sklonu vedení	$\alpha = 0^\circ$
Účinnost valivého vedení	$\eta_v = 0,98$
Účinnost KŠM	$\eta_s = 0,92$
Účinnost pro oboustranné uložení v kuličkových ložiskách	$\eta_L = 0,92$
Součinitel tření ve vodících plochách valivého vedení	$f_1 = 0,005$
Ekvivalentní součinitel tření v KŠM redukováný na poloměr šroubu	$f_2 = 0,003$
Hmotnost příčnicku bez saní s vřetenem	$m_{p1} = 40 \text{ kg}$
Hmotnost saní s vřetenem	$m_{sv} = 30 \text{ kg}$

Pokračování **Tab. 14**

Maximální rychlost posuvu	$v_{\max} = 0,08 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
Řezná síla při frézování	$F_{cf} = 222 \text{ N}$
Vzdálenost mezi ložisky	$l_{dx} = 0,85 \text{ m}$
Čas potřebný na rozběh na rychlost rychloposuvu	$t = 0,5 \text{ s}$

Výpočet kuličkového šroubu a pohonu je proveden s podporou literatury [1], [19].

Otáčky kuličkového šroubu při rychloposuvu:

$$n_s = \frac{60 \cdot v_{\max}}{s} = \frac{60 \cdot 0,08}{0,005} = 960 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (19)$$

Kritické otáčky:

$$n_k = k_d \cdot \frac{d_k}{l_{dx}^2} \cdot 10^5 = 1,88 \cdot \frac{0,0135}{0,85^2} \cdot 10^5 = 3513 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (20)$$

Maximální přípustné otáčky:

$$n_{\max} = 0,8 \cdot n_k = 0,8 \cdot 3513 = 2810 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (21)$$

Kontrola DN (otáčkového) faktoru:

$$D_N = d_{0s} \cdot n_s \cdot 1000 = 0,016 \cdot 960 \cdot 1000 = 15360 \quad (22)$$

Pro okružovaný šroub s vymezenou vůlí je maximální dovolený otáčkový faktor $D_{N\max} = 90000$. [19]

$$D_N < D_{N\max} \rightarrow 15360 < 90000 \rightarrow \text{VYHOVUJE} \quad (23)$$

Přípustné axiální zatížení kuličkového šroubu:

$$F_k = k_k \cdot \frac{d_k^4}{l_{dx}^2} \cdot 10^5 = 2,05 \cdot \frac{0,0135^4}{0,85^2} \cdot 10^{11} = 9424 \text{ N} \quad (24)$$

Maximální přípustné zatížení šroubu v pracovních podmínkách:

$$F_{k\max} = F_k \cdot 0,5 = 9424 \cdot 0,5 = 4712 \text{ N} \quad (25)$$

Kontrola vzpěrné tuhosti:

$$F_{cf} < F_{k\max} \rightarrow 222 < 4712 \rightarrow \text{VYHOVUJE} \quad (26)$$

Životnost kuličkového šroubu v otáčkách:

$$L = \left(\frac{C_{dyn}}{F_{cf}} \right)^3 \cdot 10^6 = \left(\frac{9600}{222} \right)^3 \cdot 10^6 = 8,1 \cdot 10^{10} \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (27)$$

Životnost kuličkového šroubu v provozních hodinách:

$$L_h = \left(\frac{C_{dyn}}{F_{cf}} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{n_s \cdot 60} = \left(\frac{9600}{222} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{960 \cdot 60} = 1403887 \text{ h} \quad (28)$$

Jak je patrné z výpočtu, kuličkový šroub je značně předimenzován a mohl by být menších rozměrů. Z konstrukčního hlediska by ovšem ukončení kuličkového šroubu bylo velmi malé a byl by problém s kompatibilitou dalších komponent této posuvové soustavy. Z uvedeného důvodu nebude průměr kuličkového šroubu zmenšován a kuličkový šroub bude shledán přijatelným pro dané použití.

Celková účinnost stanovena odhadem hodnot:

$$\eta_c = \eta_v \cdot \eta_s \cdot \eta_L = 0,98 \cdot 0,92 \cdot 0,92 = 0,8295 \quad (29)$$

Minimální potřebný moment pro pohon osy x dle statického hlediska:

$$M_{xs} = \frac{F_{cf} \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} = \frac{222 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi \cdot 0,8295} = 0,21 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (30)$$

Lineární zrychlení osy X:

$$a_x = \frac{v_{\max}}{t} = \frac{0,08}{0,5} = 0,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \quad (31)$$

Požadované úhlové zrychlení kuličkového šroubu a zároveň motoru:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot a_x}{s} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,16}{0,005} = 201 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2} \quad (32)$$

Dle hodnot vypočtených z rovnice (30) a (32) je volen krokový motor řady S SERVO s označením SM 56-L od výrobce FASTECH. Dodavatelem v České republice je například Zlínská firma Raveo. Jedná se o 2-fázový krokový motor s inkrementálním optickým snímačem a driverem. Enkodérem je dle výrobce zaručeno přesné polohování bez ztráty kroku. Motor je s kuličkovým šroubem spojen na přímo pomocí pružné spojky LK2-C od výrobce COUP-LINK. Hodnoty potřebné pro výpočet minimálního momentu motoru z hlediska dynamiky jsou uvedeny v Tab. 15. [16], [20]

Hodnota momentu setrvačnosti kuličkového šroubu a spojky je určena pomocí softwaru Autodesk Inventor. Moment setrvačnosti motoru je odečten z katalogového listu výrobce motoru.

Další konstrukční variantou by bylo použití AC servomotoru s frekvenčním měničem. Tato varianta by poskytla vyšší dynamiku pohonu, avšak nevýhodou by byla vyšší cena celkového pohonu.

Tab. 15 Velikosti momentů setrvačnosti součástí osy X

Název	Hodnota
Moment setrvačnosti krokového motoru	$J_{\text{mot}} = 4,8 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Moment setrvačnosti pružné spojky	$J_{\text{spoj}} = 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Moment setrvačnosti kuličkového šroubu osy x	$J_{\text{ksx}} = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

Předepnutí kuličkového šroubu:

$$F_p = 0,35 \cdot F_{cf} = 0,35 \cdot 222 = 77,7 \text{ N} \quad (33)$$

Zatěžování pohonu vlivem složek momentů od přesouvaných hmot:

$$M_{Gx} = \frac{\left(\frac{m_{p1}}{2} + m_{sv}\right) \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot s}{2 \cdot \pi} = \frac{\left(\frac{40}{2} + 30\right) \cdot 9,81 \cdot \sin 0 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi} = 0 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (34)$$

Ztrátový moment pasivních odporů způsobený gravitací přesouvaných hmot:

$$\begin{aligned} M_{GTx} &= \frac{\left(\frac{m_{p1}}{2} + m_{sv}\right) \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos \alpha \cdot s}{2 \cdot \pi} = \\ &= \frac{\left(\frac{40}{2} + 30\right) \cdot 9,81 \cdot 0,005 \cdot \cos 0 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi} = 0,002 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned} \quad (35)$$

Ztrátový moment pasivních odporů způsobený odporem v KŠM:

$$\begin{aligned} M_{KSMx} &= \frac{F_p \cdot s}{2 \cdot \pi} \cdot (1 - \eta_s^2) + \frac{0,5 \cdot \left(\frac{m_{p1}}{2} + m_{sv}\right) \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos \alpha \cdot d_{0s} \cdot f_2}{1} = \\ &= \frac{77,7 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi} \cdot (1 - 0,92^2) + \frac{0,5 \cdot \left(\frac{40}{2} + 30\right) \cdot 9,81 \cdot 0,005 \cdot \cos 0 \cdot 0,016 \cdot 0,003}{1} = \\ &= 0,010 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned} \quad (36)$$

Celkový moment zátěže redukováný na hřídel motoru:

$$M_{zdrhnx} = M_{Gx} + M_{GTx} + M_{KSMx} = 0 + 0,002 + 0,010 = 0,012 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (37)$$

Moment setrvačnosti posuvných hmot redukováný do osy šroubu:

$$J_{mx} = \left(\frac{m_{p1}}{2} + m_{sv}\right) \cdot \left(\frac{s}{2 \cdot \pi}\right)^2 = \left(\frac{40}{2} + 30\right) \cdot \left(\frac{0,005}{2 \cdot \pi}\right)^2 = 3,17 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (38)$$

Celkový moment setrvačnosti redukováný na hřídel motoru:

$$\begin{aligned} J_{rhm} &= J_{mot} + J_{spoj} + J_{ksx} + J_{mx} = 4,8 \cdot 10^{-5} + 6,94 \cdot 10^{-7} + 4,52 \cdot 10^{-5} + \\ &+ 3,17 \cdot 10^{-5} = 1,26 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \end{aligned} \quad (39)$$

Minimální potřebný moment dle dynamického hlediska:

$$M_{xd} = J_{rhm} \cdot \varepsilon_m + M_{zdrhm} = 1,26 \cdot 10^{-4} \cdot 201 + 0,012 = 0,04 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (40)$$

Kontrola kvality dynamických poměrů:

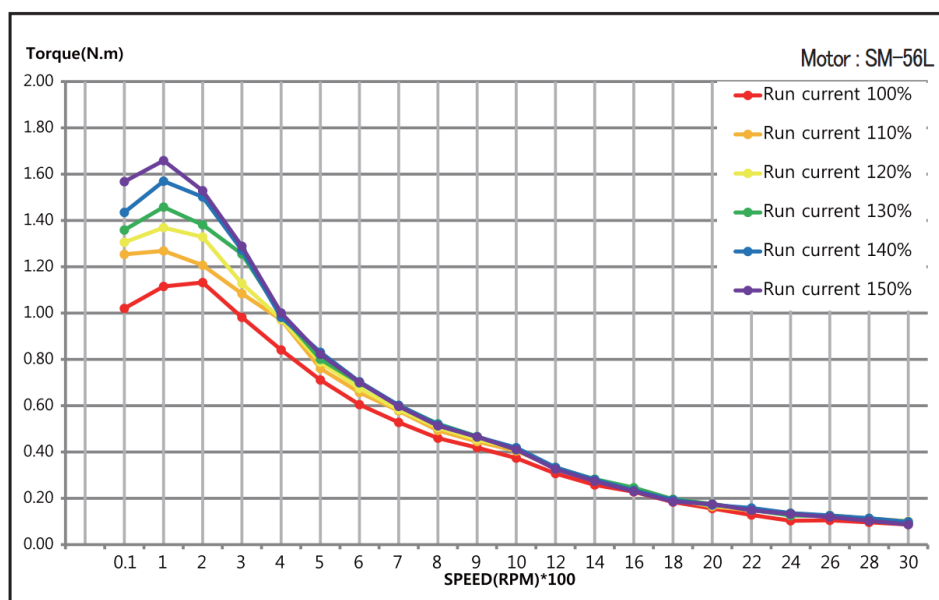
$$\frac{J_{rhm}}{J_{mot}} = \frac{1,26 \cdot 10^{-4}}{4,8 \cdot 10^{-5}} = 2,6 \quad (41)$$

Pro kvalitní dynamické poměry by měl poměr mezi momentem setrvačnosti redukováným na hřídel motoru a momentem setrvačnosti motoru nabývat hodnot 1,5 - 3. Toto kritérium je splněno. Pro dosažení lepších hodnot by bylo vhodné volit pro pohon servomotor, avšak pro použití konstruovaného stroje je tento parametr dostatečný. [1]

Volený krokový motor FASTECH S SERVO SM56-L má nominální hodnotu momentu 1,853 N.m, ale je nutno odečíst z momentové křivky velikost momentu motoru při 960 ot.min⁻¹, které jsou nutné k dosažení stanovené rychlosti rychloposuvu. Dle grafu (Obr. 28) je motor navržen správně a potřebné hodnoty momentu bude dosahovat.



Obr. 27 Krokové motory S-Servo [20]



Obr. 28 Momentová charakteristika krokového motoru S-Servo SM-56L [20]

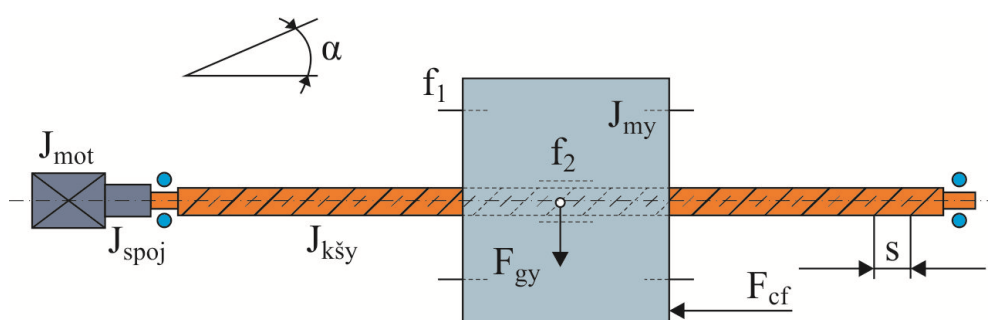


Obr. 29 Model krokového motoru s držákem, domečkem a pružnou spojkou

5.4.2 Návrh pohonu osy Y

Pohon osy y je řešen stejným způsobem jako u osy X. Osa Y je vybavena stejným kuličkovým šroubem, jaký je použit u osy X, a to kuličkovým šroubem s velikostí vnějšího průměru 16 mm a stoupáním 5 mm od firmy HIWIN. Matice je rovněž použita dvojité předepnutá přírubová, taktéž od firmy HIWIN - DDB1605-R-3EF. Kuličkový šroub bude uložen u motoru radiálně i axiálně nepohyblivě, použitý domeček bude FK-12 od firmy HIWIN. Na druhém konci bude šroub uložen radiálně nepohyblivě a axiálně pohyblivě, použitý domeček bude FF-12, rovněž od výrobce HIWIN. Domeček pro matici šroubu bude z konstrukčních důvodů vlastní výroby. Opracování konců je opět voleno standardní dle výrobce. [19]

Potřebné hmotnosti byly zjištěny dle softwaru Autodesk Inventor. Parametry vstupující do výpočtu pohonu jsou shrnuty v Tab. 16.



Obr. 30 Výpočtový model posuvové souřadnice Y

Tab. 16 Parametry pro návrh posuvové soustavy Y

Název	Hodnota
Jmenovitý průměr kuličkového šroubu	$d_{0s} = 0,016 \text{ m}$
Malý průměr závitu kuličkového šroubu	$d_k = 0,0135 \text{ m}$
Stoupání kuličkového šroubu	$s = 0,005 \text{ m}$
Statická tuhost KŠM	$C_0 = 12700 \text{ N}$
Dynamická tuhost KŠM	$C_{dyn} = 9600 \text{ N}$
Koeficient v závislosti na uložení pro otáčky	$k_d = 1,88$
Koeficient v závislosti na uložení pro vzpěr	$k_k = 2,05$
Úhel sklonu vedení	$\alpha = 0^\circ$
Účinnost valivého vedení	$\eta_v = 0,98$
Účinnost KŠM	$\eta_s = 0,92$
Účinnost pro oboustranné uložení v kuličkových ložiskách	$\eta_L = 0,92$
Součinitel tření ve vodících plochách valivého vedení	$f_1 = 0,005$
Ekvivalentní součinitel tření v KŠM redukovaný na poloměr šroubu	$f_2 = 0,003$
Hmotnost saní s vřetenem	$m_{sv} = 30 \text{ kg}$
Maximální rychlost posuvu	$v_{max} = 0,08 \text{ m.min}^{-1}$
Řezná síla při frézování	$F_{cf} = 222 \text{ N}$
Vzdálenost mezi ložisky	$l_{dy} = 0,7 \text{ m}$
Čas potřebný na rozběh na rychlost rychloposuvu	$t = 0,5 \text{ s}$

Výpočet kuličkového šroubu a pohonu je proveden s podporou literatury [1], [19].

Otáčky kuličkového šroubu při rychloposuvu:

$$n_{\dot{s}} = \frac{60 \cdot v_{\max}}{s} = \frac{60 \cdot 0,08}{0,005} = 960 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (42)$$

Kritické otáčky:

$$n_k = k_d \cdot \frac{d_k}{l_{dy}^2} \cdot 10^5 = 1,88 \cdot \frac{0,0135}{0,7^2} \cdot 10^5 = 5180 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (43)$$

Maximální přípustné otáčky:

$$n_{\max} = 0,8 \cdot n_k = 0,8 \cdot 5180 = 4144 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (44)$$

Kontrola DN (otáčkového) faktoru:

$$D_N = d_{0\dot{s}} \cdot n_{\dot{s}} \cdot 1000 = 0,016 \cdot 960 \cdot 1000 = 15360 \quad (45)$$

Pro okružovaný šroub s vymezenou vřtí je maximální dovolený otáčkový faktor $D_{N\max} = 90000$. [19]

$$D_N < D_{N\max} \rightarrow 15360 < 90000 \rightarrow \text{VYHOVUJE} \quad (46)$$

Přípustné axiální zatížení kuličkového šroubu:

$$F_k = k_k \cdot \frac{d_k^4}{l_{dy}^2} \cdot 10^5 = 2,05 \cdot \frac{0,0135^4}{0,7^2} \cdot 10^{11} = 13896 \text{ N} \quad (47)$$

Maximální přípustné zatížení šroubu v pracovních podmínkách:

$$F_{k\max} = F_k \cdot 0,5 = 9424 \cdot 0,5 = 4712 \text{ N} \quad (48)$$

Kontrola vzpěrné tuhosti:

$$F_{cf} < F_{k\max} \rightarrow 222 < 4712 \rightarrow \text{VYHOVUJE} \quad (49)$$

Životnost kuličkového šroubu v otáčkách:

$$L = \left(\frac{C_{dyn}}{F_{cf}} \right)^3 \cdot 10^6 = \left(\frac{9600}{222} \right)^3 \cdot 10^6 = 8,1 \cdot 10^{10} \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (50)$$

Životnost kuličkového šroubu v provozních hodinách:

$$L_h = \left(\frac{C_{dyn}}{F_{cf}} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{n_{\dot{s}} \cdot 60} = \left(\frac{9600}{222} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{960 \cdot 60} = 1403887 \text{ h} \quad (51)$$

Z výpočtu je patrné, že použitý kuličkový šroub je stejně jako u osy X značně předdimenzován. Ze stejných důvodů jako u osy X ale bude tento šroub shledán pro konstrukci přijatelným.

Celková účinnost stanovena odhadem hodnot:

$$\eta_c = \eta_v \cdot \eta_{\dot{s}} \cdot \eta_L = 0,98 \cdot 0,92 \cdot 0,92 = 0,8295 \quad (52)$$

Minimální potřebný moment pro pohon osy y dle statického hlediska:

$$M_{ys} = \frac{F_{cf} \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} = \frac{222 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi \cdot 0,8295} = 0,21 N \cdot m \quad (53)$$

Lineární zrychlení osy Y:

$$a_y = \frac{v_{\max}}{t} = \frac{0,08}{0,5} = 0,16 m \cdot s^{-2} \quad (54)$$

Požadované úhlové zrychlení kuličkového šroubu a zároveň motoru:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot a_y}{s} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,16}{0,005} = 201 rad \cdot s^{-2} \quad (55)$$

Krokový motor je volen identický jako u osy X, motor je volen dle rovnic (53) a (55). Jedná se o motor FASTECH S SERVO SM 56-L. Motor je s kuličkovým šroubem spojen taktéž na přímo pomocí pružné spojky LK2-C od výrobce COUP-LINK. [16], [20]

Hodnoty potřebné pro výpočet minimálního momentu motoru z hlediska dynamiky jsou uvedeny v Tab. 17. Ke stanovení momentů setrvačnosti kuličkového šroubu a spojky byl opět využit software Autodesk Inventor.

Použití servomotoru je zamítnuto ze stejného důvodu jako u osy X.

Tab. 17 Velikosti momentů setrvačnosti součástí osy Y

Název	Hodnota
Moment setrvačnosti krokového motoru	$J_{\text{mot}} = 4,8 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Moment setrvačnosti pružné spojky	$J_{\text{spoj}} = 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Moment setrvačnosti kuličkového šroubu osy y	$J_{\text{kss}} = 3,8 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

Předepnutí kuličkového šroubu:

$$F_P = 0,35 \cdot F_{cf} = 0,35 \cdot 222 = 77,7 N \quad (56)$$

Zatěžování pohonu vlivem složek momentů od přesouvaných hmot:

$$M_{Gy} = \frac{m_{sv} \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot s}{2 \cdot \pi} = \frac{30 \cdot 9,81 \cdot \sin 0 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi} = 0 N \cdot m \quad (57)$$

Ztrátový moment pasivních odporů způsobený gravitací přesouvaných hmot:

$$\begin{aligned} M_{GTy} &= \frac{m_{sv} \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos \alpha \cdot s}{2 \cdot \pi} = \\ &= \frac{30 \cdot 9,81 \cdot 0,005 \cdot \cos 0 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi} = 0,001 N \cdot m \end{aligned} \quad (58)$$

Ztrátový moment pasivních odporů způsobený odporem v KŠM:

$$\begin{aligned} M_{KSMY} &= \frac{F_P \cdot s}{2 \cdot \pi} \cdot (1 - \eta_s^2) + \frac{0,5 \cdot m_{sv} \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos \alpha \cdot d_{0s} \cdot f_2}{1} = \\ &= \frac{77,7 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi} \cdot (1 - 0,92^2) + \frac{0,5 \cdot 30 \cdot 9,81 \cdot 0,005 \cdot \cos 0 \cdot 0,016 \cdot 0,003}{1} = \\ &= 0,010 N \cdot m \end{aligned} \quad (59)$$

Celkový moment zátěže redukováný na hřídel motoru:

$$M_{zdrhny} = M_{Gx} + M_{GTx} + M_{KSMx} = 0 + 0,001 + 0,010 = 0,011 N \cdot m \quad (60)$$

Moment setrvačnosti posuvných hmot redukováný do osy šroubu:

$$J_{my} = m_{sv} \cdot \left(\frac{s}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 30 \cdot \left(\frac{0,005}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 1,90 \cdot 10^{-5} kg \cdot m^2 \quad (61)$$

Celkový moment setrvačnosti redukováný na hřídel motoru:

$$J_{rhm} = J_{mot} + J_{spoj} + J_{ksy} + J_{my} = 4,8 \cdot 10^{-5} + 6,94 \cdot 10^{-7} + 3,77 \cdot 10^{-5} + 1,90 \cdot 10^{-5} = 1,05 \cdot 10^{-4} kg \cdot m^2 \quad (62)$$

Minimální potřebný moment dle dynamického hlediska:

$$M_{yd} = J_{rhm} \cdot \varepsilon_m + M_{zdrhny} = 1,05 \cdot 10^{-4} \cdot 201 + 0,011 = 0,03 N \cdot m \quad (63)$$

Kontrola kvality dynamických poměrů:

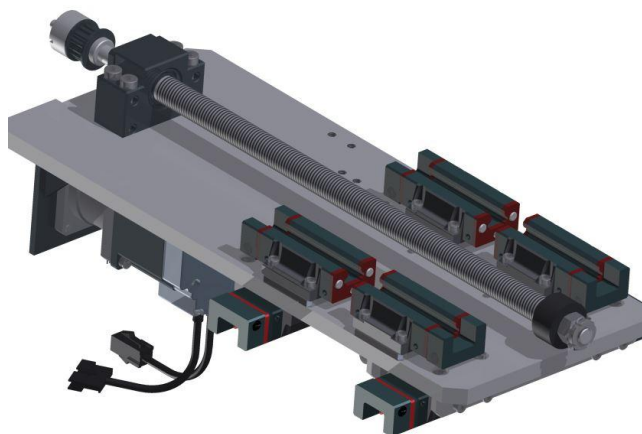
$$\frac{J_{rhm}}{J_{mot}} = \frac{1,05 \cdot 10^{-4}}{4,8 \cdot 10^{-5}} = 2,2 \quad (64)$$

Poměr momentu setrvačnosti redukováného na hřídel motoru a momentu setrvačnosti motoru je v intervalu mezi 1,5 - 3, z čehož plyne, že správné dynamické poměry jsou splněny.

Volený krokový motor FASTECH S SERVO SM56-L tedy vyhovuje a dle momentové křivky viz Obr. 28 při 960 ot.min⁻¹ splňuje velikost požadovaného momentu.

5.4.3 Návrh pohonu osy Z

Pohon osy z je řešen stejně jako u os X a Y. Pro pohon osy je použit okružovaný kuličkový šroub s vnějším průměrem 16 mm a stoupáním 5 mm. Matice je použita dvojité předepnutá přírubová – DDB1605-R-3EF. Kuličkový šroub bude uložen u motoru radiálně i axiálně nepohyblivě, pomocí domečku FK-12 firmy HIWIN. Druhý konec bude z konstrukčních důvodů uložen volně, čímž je dosaženo konstrukčně jednoduššího řešení uložení šroubu. Opracování konců kuličkového šroubu je přizpůsobeno s ohledem na konstrukci - použití řemenového převodu. Domeček matice kuličkového šroubu je z konstrukčních důvodů rovněž vlastní výroby. [19]



Obr. 31 Uložení kuličkového šroubu pro pohon osy Z

Z konstrukčních důvodů (úspora místa) bude pohon šroubu zajištěn řemenovým převodem s řemenem HTD od výrobce Contitech. Řemenový převod bude mít převodový poměr 1, z čehož plyne, že bude pouze převádět rotační pohyb hřídele motoru na šroub bez změny velikosti otáček či kroutícího momentu. Použité řemenice mají označení HTD 5M 14-05 15 a jsou dodávány firmou TYMA. Řemenice jsou s hřídeli spojeny pomocí svěrných pouzder TLK 110, které jsou dodávány firmou T.E.A. TECHNIK s.r.o. Řemen bude napínán pomocí posuvné desky, na které je uložen krokový motor. Výpočet řemenového spoje je proveden s pomocí softwaru, který dodává společnost Contitech, výstup z výpočtového softwaru této firmy je zobrazen na Obr. 31. [22], [24], [25]

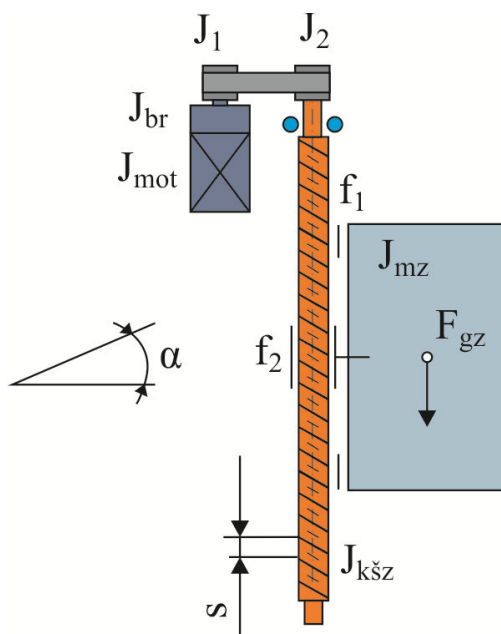


Obr. 32 Řemen HTD [23]

Profil zubu	PROF	=	5M	
Rozteč zubů	T	=	5,00	mm
Počet zubů malé řemenice	ZK	=	14	
Účinný průměr malé řemenice	DWK	=	22,28	mm
Počet zubů velké řemenice	ZG	=	14	
Účinný průměr velké řemenice	DWG	=	22,28	mm
Otáčky malé řemenice	NK	=	600,00	rpm
Otáčky velké řemenice	NG	=	600,00	rpm
Převodový poměr	I	=	1,00	
Délka řemenu	LW	=	225,00	mm
Počet zubů řemenu	Z	=	45,00	
Osová vzdálenost	AER	=	77,50	mm
Úhel opásání malé řemenice	BETA	=	180,00	grd
Počet zubů v záběru malé řemenice	ZE	=	7,00	
Rychlost řemenu	V	=	0,70	m/s
Ohybová frekvence při provozu	BF	=	6,22	Hz
Celkový provozní součinitel	C0	=	1,80	
Součinitel počtu zubů v záběru	C1	=	1,00	
Součinitel délky	C5	=	0,80	
Požadovaný přenášený výkon	P	=	0,04	kW
Krouticí moment na malé řemenici	MDK	=	0,60	Nm
Krouticí moment na velké řemenici	MDG	=	0,60	Nm
Vypočtená šířka řemenu	BERR	=	7,68	mm
Zvolená šířka řemenu	B	=	14,00	mm
Hodnota výkonu pro zvolenou šířku řemenu	PR	=	0,14	kW
Vypočtený celkový provozní součinitel	COER	=	3,77	
Obvodová síla	FU	=	53,86	N
Statická síla ve větvi	FSTAT	=	74,00	N
Celková předepínací síla	FV	=	148,00	N
Součinitel zatížení předpětím	k1	=	1,00	
Provozní součinitel předpětí	k2	=	1,00	
Kontrolní síla	FE	=	51,40	N
Průhyb od kontrolní síly	TE	=	4,42	mm
Vlastní frekvence volné větve	EIF	=	254	Hz

Obr. 33 Výsledky výpočtu řemenového spoje ze softwaru firmy Contitech [22]

Ke zjištění hmotnosti potřebných částí byl použit software Autodesk Inventor. Parametry vstupující do výpočtu pohonu jsou shrnuty v Tab. 18.



Tab. 18 Parametry pro návrh posuvové soustavy Z

Název	Hodnota
Jmenovitý průměr kuličkového šroubu	$d_{0s} = 0,016 \text{ m}$
Malý průměr závitu kuličkového šroubu	$d_k = 0,0135 \text{ m}$
Stoupání kuličkového šroubu	$s = 0,005 \text{ m}$
Statická tuhost KŠM	$C_0 = 12700 \text{ N}$
Dynamická tuhost KŠM	$C_{\text{dyn}} = 9600 \text{ N}$
Koeficient v závislosti na uložení pro otáčky	$k_{dz} = 0,42$
Koeficient v závislosti na uložení pro vzpěr	$k_{kz} = 0,26$
Úhel sklonu vedení	$\alpha_z = 90^\circ$
Účinnost valivého vedení	$\eta_v = 0,98$
Účinnost KŠM	$\eta_s = 0,92$
Účinnost pro jednostranné uložení v kuličkových ložiskách	$\eta_{Lz} = 0,97$
Účinnost řemenového převodu	$\eta_1 = 0,99$
Převodový poměr řemenového převodu	$i_1 = 1$
Součinitel tření ve vodících plochách valivého vedení	$f_1 = 0,005$
Ekvivalentní součinitel tření v KŠM redukovaný na poloměr šroubu	$f_2 = 0,003$
Hmotnost osy z	$m_z = 19 \text{ kg}$
Maximální rychlost posuvu	$v_{\text{maxz}} = 0,05 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
Řezná síla při frézování	$F_{\text{cf}} = 222 \text{ N}$
Vzdálenost mezi ložisky	$l_{dz} = 0,35 \text{ m}$
Čas potřebný na rozběh na rychlost rychloposuvu	$t = 0,5 \text{ s}$

Výpočet kuličkového šroubu a pohonu je proveden s podporou literatury [1], [19]. Ve výpočtu není zahrnuta síla, která vzniká při vrtání, jelikož tato síla bude vřetenem nadlehčovat.

Otáčky kuličkového šroubu při rychloposuvu:

$$n_s = \frac{60 \cdot v_{\max z}}{s} = \frac{60 \cdot 0,08}{0,005} = 600 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (65)$$

Kritické otáčky:

$$n_k = k_{dz} \cdot \frac{d_k^4}{l_{dz}^2} \cdot 10^5 = 0,42 \cdot \frac{0,0135^4}{0,35^2} \cdot 10^5 = 4629 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (66)$$

Maximální přípustné otáčky:

$$n_{\max} = 0,8 \cdot n_k = 0,8 \cdot 4629 = 3703 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (67)$$

Kontrola DN (otáčkového) faktoru:

$$D_N = d_{0s} \cdot n_s \cdot 1000 = 0,016 \cdot 600 \cdot 1000 = 9600 \quad (68)$$

Pro okružovaný šroub s vymezenou vůlí je maximální dovolený otáčkový faktor $D_{N\max} = 90000$. [19]

$$D_N < D_{N\max} \rightarrow 9600 < 90000 \rightarrow \text{VYHOVUJE} \quad (69)$$

Přípustné axiální zatížení kuličkového šroubu:

$$F_k = k_{kz} \cdot \frac{d_k^4}{l_{dz}^2} \cdot 10^5 = 0,26 \cdot \frac{0,0135^4}{0,35^2} \cdot 10^{11} = 7050 \text{ N} \quad (70)$$

Maximální přípustné zatížení šroubu v pracovních podmínkách:

$$F_{k\max} = F_k \cdot 0,5 = 7050 \cdot 0,5 = 3525 \text{ N} \quad (71)$$

Kontrola vzpěrné tuhosti:

$$F_{cf} < F_{k\max} \rightarrow 222 < 3525 \rightarrow \text{VYHOVUJE} \quad (72)$$

Životnost kuličkového šroubu v otáčkách:

$$L = \left(\frac{C_{dyn}}{F_{cf}} \right)^3 \cdot 10^6 = \left(\frac{9600}{222} \right)^3 \cdot 10^6 = 8,1 \cdot 10^{10} \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (73)$$

Životnost kuličkového šroubu v provozních hodinách:

$$L_h = \left(\frac{C_{dyn}}{F_{cf}} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{n_s \cdot 60} = \left(\frac{9600}{222} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{600 \cdot 60} = 2246220 \text{ h} \quad (74)$$

Z výpočtu je patrné, že použitý kuličkový šroub je stejně jako u os X a Y značně předimenzován. Ze stejných důvodů jako u těchto os ale bude tento šroub použit.

Celková účinnost stanovena odhadem hodnot:

$$\eta_c = \eta_v \cdot \eta_s \cdot \eta_{Lz} \cdot \eta_1 = 0,98 \cdot 0,92 \cdot 0,97 \cdot 0,99 = 0,8658 \quad (75)$$

Minimální potřebný moment pro pohon osy z dle statického hlediska:

$$M_{zs} = \frac{F_{cf} \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i_1 \cdot \eta_c} + \frac{m_z \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i_1 \cdot \eta_c} = \frac{222 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 0,8658} + \frac{19 \cdot 9,81 \cdot \sin 90 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 0,8658} = 0,38 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (76)$$

Lineární zrychlení osy Z:

$$a_z = \frac{v_{\max z}}{t} = \frac{0,05}{0,5} = 0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \quad (77)$$

Požadované úhlové zrychlení kuličkového šroubu a zároveň motoru:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot a_z}{s} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,16}{0,005} = 126 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2} \quad (78)$$

Krokový motor je použit identický jako u všech os, motor je volen dle rovnic (76) a (78). Jedná se o motor FASTECH S SERVO SM 56-L, který je z bezpečnostních důvodů vybaven příslušenstvím v podobě elektro-mechanické brzdy taktéž od firmy FASTECH.

Hodnoty potřebné pro výpočet minimálního momentu motoru z hlediska dynamiky jsou uvedeny v Tab. 19. Ke stanovení momentů setrvačností byl opět využit software Autodesk Inventor.

Použití servomotoru je zamítnuto ze stejného důvodu jako u os X a Y.

Tab. 19 Velikosti momentů setrvačnosti součástí osy Z

Název	Hodnota
Moment setrvačnosti krokového motoru	$J_{\text{mot}} = 4,8 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Moment setrvačnosti brzdy	$J_{\text{br}} = 9,6 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Moment setrvačnosti řemenice se svěrným pouzdem	$J_1 = J_2 = 5,01 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Moment setrvačnosti kuličkového šroubu osy z	$J_{\text{ksz}} = 2,1 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

Předepnutí kuličkového šroubu:

$$F_p = 0,35 \cdot m_z \cdot g = 0,35 \cdot 19 \cdot 9,81 = 65 \text{ N} \quad (79)$$

Zatěžování pohonu vlivem složek momentů od přesouvaných hmot:

$$M_{Gz} = \frac{m_z \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i_1 \cdot \eta_1} = \frac{19 \cdot 9,81 \cdot \sin 90 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 0,99} = 0,15 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (80)$$

Ztrátový moment pasivních odporů způsobený gravitací přesouvaných hmot:

$$M_{GTz} = \frac{m_z \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos \alpha \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i_1 \cdot \eta_1} = \frac{19 \cdot 9,81 \cdot 0,005 \cdot \cos 90 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 0,99} = 0 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (81)$$

Ztrátový moment pasivních odporů způsobený odporem v KŠM:

$$\begin{aligned}
 M_{KSMz} &= \frac{F_p \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i_1 \cdot \eta_1} \cdot (1 - \eta_s^2) + \frac{0,5 \cdot m_z \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos \alpha \cdot d_{0s} \cdot f_2}{i_1 \cdot \eta_1} = \\
 &= \frac{65 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 0,99} \cdot (1 - 0,92^2) + \frac{0,5 \cdot 19 \cdot 9,81 \cdot 0,005 \cdot \cos 90 \cdot 0,016 \cdot 0,003}{1 \cdot 0,99} = \\
 &= 0,01 N \cdot m
 \end{aligned} \tag{82}$$

Celkový moment zátěže redukováný na hřídel motoru:

$$M_{zdrhnz} = M_{Gz} + M_{GTz} + M_{KSMz} = 0,15 + 0 + 0,01 = 0,16 N \cdot m \tag{83}$$

Moment setrvačnosti posuvných hmot redukováný do osy šroubu:

$$J_{mz} = m_z \cdot \left(\frac{s}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 19 \cdot \left(\frac{0,005}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 1,20 \cdot 10^{-5} kg \cdot m^2 \tag{84}$$

Celkový moment setrvačnosti redukováný na hřídel motoru:

$$\begin{aligned}
 J_{rhm} &= J_{mot} + J_{br} + J_1 + J_2 + J_{mz} = 4,8 \cdot 10^{-5} + 9,6 \cdot 10^{-6} + 5,01 \cdot 10^{-6} + \\
 &+ 5,01 \cdot 10^{-6} + 1,20 \cdot 10^{-5} = 8 \cdot 10^{-5} kg \cdot m^2
 \end{aligned} \tag{85}$$

Minimální potřebný moment dle dynamického hlediska:

$$M_{zd} = J_{rhm} \cdot \varepsilon_m + M_{zdrhmz} = 8 \cdot 10^{-5} \cdot 126 + 0,16 = 0,17 N \cdot m \tag{86}$$

Kontrola kvality dynamických poměrů:

$$\frac{J_{rhm}}{J_{mot}} = \frac{8 \cdot 10^{-5}}{4,8 \cdot 10^{-5}} = 1,7 \tag{87}$$

Poměr momentu setrvačnosti redukovaneho na hřídel motoru a momentu setrvačnosti motoru je v intervalu mezi 1,5 - 3, z čehož plyne, že správné dynamické poměry jsou splněny.

Volený krokový motor FASTECH S SERVO SM56-L tedy vyhovuje a dle momentové křivky (Obr. 28) při 600 ot.min⁻¹ splňuje velikost požadovaného momentu.

5.5 Varianty řešení vedení stroje

Vedení obráběcích strojů slouží k definovanému pohybu posouvajících se částí. Vedení by mělo vykazovat vysokou statickou a dynamickou tuhost, mělo by disponovat možnostmi vymezení vůle, odolností proti opotřebení. Při stavbě obráběcích strojů se používají vedení kluzné, valivé, kombinované a jiné (aerostatické). [1]

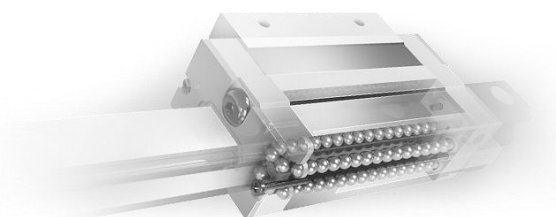
Kluzná vedení se dle třecích poměrů využívají ve dvou variantách - hydrostatické a hydrodynamické. Principem kluzného vedení je neměnný a stálý po dlouhá léta. Skládá se z kalené lišty, nejlépe z jednoho kusu odlitku základny, proti této liště je umístěn suport s vnitřní lepenou hmotou Turcite. Při použití tohoto typu vedení může být snižována jakost práce především nestabilitou pohybu (zejména u hydrodynamického typu). Tato vlastnost se projevuje nerovnoměrným trhavým pohybem a necitlivostí (nelze nastavit nástroj vůči obrobku). Tyto zápory jsou odstraněny při použití hydrostatického typu, ovšem nevýhodou je složitá konstrukce, nutnost použití čerpadla, nutnost pečlivé filtrace oleje, náročná výroba, údržba a nákladný provoz. Výhodou kluzného vedení je naopak vyšší únosnost, vyšší radiální

i axiální zatížení. Z uvedených důvodů je kluzné vedení při konstrukci malé modelářské CNC frézky shledáno nevhodným a je zamítnuto. [1], [26]



Obr. 35 Kluzné vedení [26]

Valivé vedení se v nedávné historii začalo používat u nejpřesnějších strojů. Lineární vedení se skládá z lišty a valivých bloků s tělisky. Tyto bloky umožňují plynulý posuv v jednotlivých osách. Přednosti tohoto vedení jsou podobné jako při použití valivých místo kluzných ložisek. Valivé vedení vyniká celkově menším součinitelem tření a nepatrným rozdílem mezi součinitelem tření za klidu a za pohybu (tento fakt vede k odstranění trhavých pohybů při nepatrných rychlostech pohybu). Dalšími výhodami je minimální opotřebení vedení a vysoká životnost, možnost předepnutí (vymezení vůle), vysoká přesnost pohybu i při malých rychlostech. Nevýhodou je vyšší náročnost na výrobu a tím způsobená i vyšší cena, menší schopnost útlumu chvění, větší rozměry než u kluzných vedení. Valivé vedení je v současné době velmi používaným a pro konstrukci stroje v této práci je shledáno vyhovujícím, a proto bude použito na všech osách stroje. [1], [26]



Obr. 36 Kuličkové vedení firmy HIWIN [18]

Nejčastěji používané valivé vedení se dělí na profilové vedení a vedení, které se pohybuje po tyčích, ať již podepřených nebo nepodepřených. U nepodepřených tyčí nastává při větších délkách problém s průhybem a nedostatečnou tuhostí, tento nedostatek částečně eliminují tyče podepřené, avšak u vedení na tyčích je obtížné vymezení vůle. Nejpoužívanější variantou je v současné době lineární profilové vedení, které dodává například firma THK, HIWIN, SKF atd. Uvedené vedení vyniká dobrou tuhostí, vysokou životností, možností předpětí, jehož velikost se vyvozuje velikostí kuliček, dobrou přesností polohování, snadnou údržbou atd. Nevýhodou oproti podepřeným či nepodepřeným tyčím je vyšší cena. [18]

Z analýzy řešení vyplývá použití lineárního profilového vedení jako nejvhodnější. Vedení bude voleno na všech osách od firmy HIWIN, a to vedení přírubové typu HGW. Vozíky vedení budou vybaveny zásobníky maziva a stěrači. Vozíky se skládají z mazací

jednotky, která je umístěna mezi koncovým těsněním a vratným systémem pro kuličky a výměnným olejovým zásobníkem. Olejový zásobník lze vyměnit bez demontáže vozíku. Vozík může být namontován v libovolné poloze, aniž by byla ovlivněna funkce mazání. Doporučený interval pro výměnu mazacích zásobníků bude uveden v návodu stroje. Pro uložení tohoto vedení je potřeba dodržet konstrukční zásady, které jsou uvedeny výrobcem.

Mezi vozíky lineárního vedení a plochou pro něj určenou budou na všech osách umístěny takzvané lícovací podložky. V případě potřeby se tyto podložky budou brousit pro zlepšení geometrie stroje při montáži.

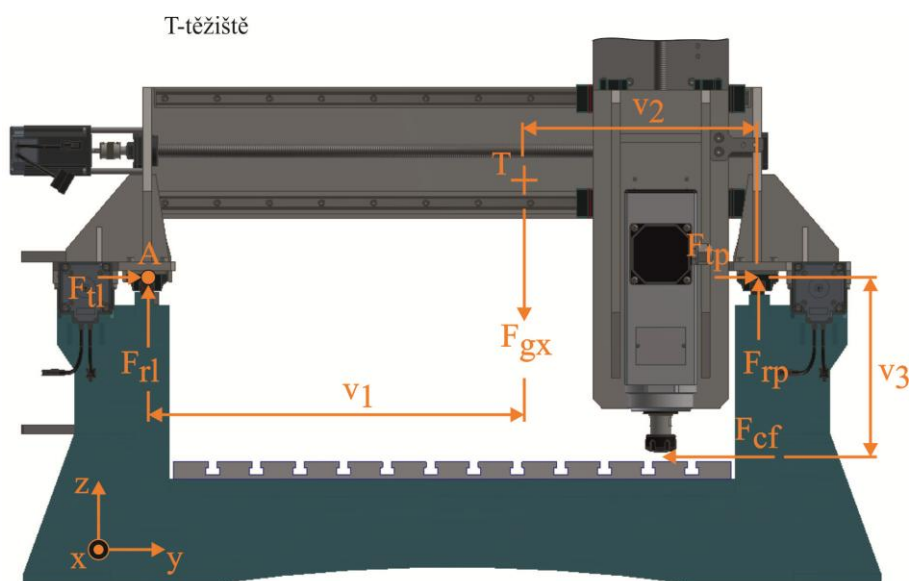
5.5.1 Návrh vedení osy x

Lineární vedení osy x bude uloženo na obdélníkových profilech, které budou navařeny na základně stroje. Na jednom z profilů bude obrobena referenční hrana (osazení), ke které bude pro snazší montáž vedení ustaveno. Kolejnice vedení bude k referenční hraně přitlačena pomocí přitlačné lišty. Druhá kolejnice referenční hranou vybavena nebude, kolejnice se usadí pomocí hodiněk na požadovaný souběh vůči kolejnici dotažené k referenční hraně. Referenční hranou bude vybaven i příčník, který bude při montáži na vozíky ustaven pomocí této plochy. Tímto řešením bude dosažena požadovaná poloha příčníku vůči lineárnímu vedení stroje.

Pro výpočet statického ekvivalentního zatížení působícího na vedení stroje v dané ose je nutné rozdělit úlohu na postupné řešení třech nosníků. Z důvodu maximální rychlosti posuvu menší než $0,1 \text{ m.s}^{-1}$ bude ve výpočtu řešeno pouze statické ekvivalentní zatížení, dynamické působení je vzhledem k velikosti stroje zanedbáno. Vedení bude však voleno dle hodnoty dynamické únosnosti udávané výrobcem. Tato hodnota je použita, protože je nižší než statická únosnost, z tohoto důvodu bude vedení dostatečně předimenzované. Výpočet je proveden pro nejkritičtější polohu, ve které se může stroj nacházet při obrábění (maximální posuv v ose x, maximální vyložení vřeteníku).

Parametry vstupující do výpočtu jsou uvedeny v Tab. 20. Výpočet je proveden s podporou firemní literatury firmy HIWIN [18]. Poloha těžiště a potřebných vzdáleností pro výpočet byla zjištěna pomocí aplikace Autodesk Inventor.

Řešení prvního nosníku - zatížení působícího na levé a pravé vedení



Obr. 37 Síly působící na lineární vedení - čelní pohled

Tab. 20 Parametry pro výpočet zatížení levé a pravé strany vedení

Název	Hodnota
Gravitační síla od hmotnosti příčnicku	$F_{gx} = 687 \text{ N}$
Řezná síla při frézování	$F_{cf} = 222 \text{ N}$
Vzdálenost v_1 (viz Obr. 36)	$v_1 = 0,424 \text{ m}$
Vzdálenost v_2 (viz Obr. 36)	$v_2 = 0,277 \text{ m}$
Vzdálenost v_3 (viz Obr. 36)	$v_3 = 0,214 \text{ m}$

Statická rovnováha sil v ose Y:

$$F_{tl} + F_{tp} - F_{cf} = 0 \quad (88)$$

Statická rovnováha sil v ose Z:

$$F_{rl} + F_{rp} - F_{gx} = 0 \quad (89)$$

Moment kolem osy X vztažený k bodu A:

$$F_{rp} \cdot (v_1 + v_2) - F_{cf} \cdot v_3 - F_{gx} \cdot v_1 = 0 \quad (90)$$

Radiální síla působící na pravé vedení [vyjádřena z rovnice (90)]:

$$F_{rp} = \frac{F_{cf} \cdot v_3 + F_{gx} \cdot v_1}{(v_1 + v_2)} = \frac{222 \cdot 0,214 + 687 \cdot 0,424}{(0,424 + 0,277)} = 483 \text{ N} \quad (91)$$

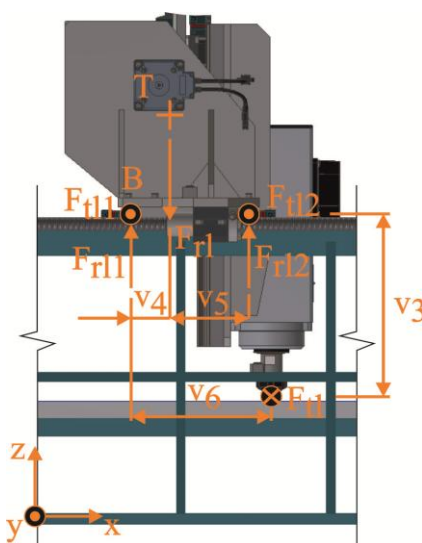
Radiální síla působící na levé vedení [vyjádřena z rovnice (89)]:

$$F_{rl} = F_{gx} - F_{rp} = 687 - 483 = 204 \text{ N} \quad (92)$$

U síly působící tečně na levé vedení je předpokládána stejná velikost jako pro tečnou sílu působící na pravé vedení. Po úpravě rovnice (88) dostáváme vztah pro výpočet jejich velikosti:

$$2 \cdot F_{tl} - F_{cf} = 0 \Rightarrow F_{tl} = F_{tp} = \frac{F_{cf}}{2} = \frac{222}{2} = 111 \text{ N} \quad (93)$$

Řešení druhého nosníku - zatížení působící na levém vedení na přední a zadní vozík



Obr. 38 Síly působící na lineární vedení - pohled zleva (levá strana vedení)

Tab. 21 Parametry pro výpočet zatížení předního a zadního vozíku levé strany vedení

Název	Hodnota
Radiální síla působící na levé vedení	$F_{rl} = 204 \text{ N}$
Tečná síla působící na levé vedení	$F_{tl} = 111 \text{ N}$
Vzdálenost v_3 (viz Obr. 37)	$v_3 = 0,214 \text{ m}$
Vzdálenost v_4 (viz Obr. 37)	$v_4 = 0,040 \text{ m}$
Vzdálenost v_5 (viz Obr. 37)	$v_5 = 0,066 \text{ m}$
Vzdálenost v_6 (viz Obr. 37)	$v_6 = 0,147 \text{ m}$

Statická rovnováha sil v ose Y:

$$F_{tl1} + F_{tl2} - F_{tl} = 0 \quad (94)$$

Statická rovnováha sil v ose Z:

$$F_{rl1} + F_{rl2} - F_{rl} = 0 \quad (95)$$

Moment kolem osy Y vztažený k bodu B:

$$F_{rl2} \cdot (v_4 + v_5) - F_{rl} \cdot v_4 = 0 \quad (96)$$

Moment kolem osy Z vztažený k bodu B:

$$F_{tl2} \cdot (v_4 + v_5) - F_{tl} \cdot v_6 = 0 \quad (97)$$

Radiální síla působící na přední vozík [vyjádřena z rovnice (96)]:

$$F_{rl2} = \frac{F_{rl} \cdot v_4}{(v_4 + v_5)} = \frac{204 \cdot 0,040}{(0,040 + 0,066)} = 77 \text{ N} \quad (98)$$

Radiální síla působící na zadní vozík [vyjádřena z rovnice (95)]:

$$F_{rl1} = F_{rl} - F_{rl2} = 204 - 77 = 127 \text{ N} \quad (99)$$

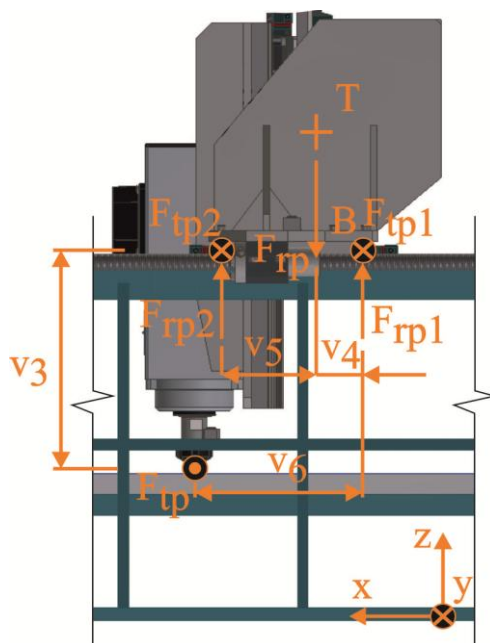
Tečná síla působící na přední vozík [vyjádřena z rovnice (97)]:

$$F_{tl2} = \frac{F_{tl} \cdot v_6}{(v_4 + v_5)} = \frac{111 \cdot 0,147}{(0,040 + 0,066)} = 154 \text{ N} \quad (100)$$

Tečná síla působící na zadní vozík [vyjádřena z rovnice (94)]:

$$F_{tl1} = F_{tl} - F_{tl2} = 111 - 154 = -43 \text{ N} \quad (101)$$

Řešení třetího nosníku - zatížení působící na pravém vedení na přední a zadní vozík



Obr. 39 Síly působící na lineární vedení - pohled zprava (pravá strana vedení)

Tab. 22 Parametry pro výpočet zatížení předního a zadního vozíku pravé strany vedení

Název	Hodnota
Radiální síla působící na pravé vedení	$F_{rl} = 483 \text{ N}$
Tečná síla působící na pravé vedení	$F_{tl} = 111 \text{ N}$
Vzdálenost v_3 (viz Obr. 38)	$v_3 = 0,214 \text{ m}$
Vzdálenost v_4 (viz Obr. 38)	$v_4 = 0,040 \text{ m}$
Vzdálenost v_5 (viz Obr. 38)	$v_5 = 0,066 \text{ m}$
Vzdálenost v_6 (viz Obr. 38)	$v_6 = 0,147 \text{ m}$

Statická rovnováha sil v ose Y:

$$F_{tp1} + F_{tp2} - F_{tp} = 0 \quad (102)$$

Statická rovnováha sil v ose Z:

$$F_{rp1} + F_{rp2} - F_{rp} = 0 \quad (103)$$

Moment kolem osy Y vztažený k bodu B:

$$F_{rp} \cdot v_4 - F_{rp2} \cdot (v_4 + v_5) = 0 \quad (104)$$

Moment kolem osy Z vztažený k bodu B:

$$F_{tp2} \cdot (v_4 + v_5) - F_{tp} \cdot v_6 = 0 \quad (105)$$

Radiální síla působící na přední vozík [vyjádřena z rovnice (104)]:

$$F_{rp2} = \frac{F_{rp} \cdot v_4}{(v_4 + v_5)} = \frac{483 \cdot 0,040}{(0,040 + 0,066)} = 182 \text{ N} \quad (106)$$

Radiální síla působící na zadní vozík [vyjádřena z rovnice (103)]:

$$F_{rp1} = F_{rp} - F_{rp2} = 483 - 182 = 301 \text{ N} \quad (107)$$

Tečná síla působící na přední vozík [vyjádřena z rovnice (106)]:

$$F_{tp2} = \frac{F_{tp} \cdot v_6}{(v_4 + v_5)} = \frac{111 \cdot 0,147}{(0,040 + 0,066)} = 154 \text{ N} \quad (108)$$

Tečná síla působící na zadní vozík [vyjádřena z rovnice (102)]:

$$F_{tp1} = F_{tp} - F_{tp2} = 111 - 154 = -43 \text{ N} \quad (109)$$

Výsledky výpočtu jsou shrnuty v Tab. 23, vozíky jsou označeny viz Obr. 36.

Tab. 23 Shrnutí zatížení na vozících u vedení osy x

Vozík	Radiální zatížení [N]	Tečné zatížení [N]
Pravý přední	182	154
Pravý zadní	301	-43
Levý přední	77	154
Levý zadní	127	-43

Z uvedených výpočtů zatížení jednotlivých vozíků je patrné, že největší ekvivalentní zatížení bude působit na pravý zadní vozík. Z tohoto důvodu bude proveden výpočet životnosti tohoto nejvíce namáhaného vozíku vedení osy X.

Zjednodušený výpočet statického ekvivalentního zatížení nejvíce zatíženého vozíku:

$$P = |F_{rp1}| + |F_{tp1}| = |301| + |-43| = 344 \text{ N} \quad (110)$$

Na základě výpočtů je voleno lineární vedení od firmy HIWIN s přírubovými vozíky, označení tohoto vedení je HGW15CC. Lineární vedení je vhodné patřičně předimenzovat, z tohoto a taktéž z konstrukčních důvodů není voleno miniaturní vedení od daného výrobce.

Parametry vstupující do výpočtu životnosti nejvíce namáhaného vozíku jsou uvedeny v Tab. 24.

Tab. 24 Parametry pro výpočet životnosti vozíku vedení

Název	Hodnota
Statické ekvivalentní zatížení	$P = 344 \text{ N}$
Dynamická únosnost vozíku vedení	$C_{dyn} = 11380 \text{ N}$
Faktor tvrdosti	$f_H = 1$
Faktor teploty	$f_T = 1$
Faktor zatížení	$f_W = 2$
Maximální rychlost rychloposuvu	$v_{max} = 4,8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Výpočet nominální životnosti v metrech:

$$L_v = \left(\frac{f_H \cdot f_T \cdot C_{dynv}}{f_W \cdot P} \right)^3 \cdot 50000 = \left(\frac{1 \cdot 1 \cdot 11380}{2 \cdot 344} \right)^3 \cdot 50000 = 2,3 \cdot 10^8 \text{ m} \quad (111)$$

Výpočet doby životnosti v hodinách:

$$L_{vh} = L \cdot \frac{100000}{v_{\max} \cdot 60} = 2,3 \cdot 10^8 \cdot \frac{100000}{4,8 \cdot 60} = 8 \cdot 10^{10} \text{ h} \quad (112)$$

Výsledek životnosti byl zjištěn ze standardního vzorce pro výpočet životnosti, který však pro extrémní hodnoty (v případě této práce nízké zatížení) vykazuje značnou nepřesnost a výsledky nekorespondují s reálnou situací. Skutečná životnost bude nižší, v dostatečné míře přesahující plánovanou životnost stroje. Na základě tohoto faktu je uvedené vedení shledáno pro konstruovaný stroj vhodným.

5.5.2 Návrh vedení osy Y a Z

Lineární vedení osy Y a Z bude rovněž uloženo na obdélníkových profilech, kdy na každém z páru profilů bude zafrézována drážka pro ustavení kolejnice lineárního vedení (referenční hrana). Kolejnice bude k této hraně přitlačena přitlačnou lištou. Druhý profil z páru referenční hranou vybaven nebude a kolejnice bude pomocí hodinek ustavena na požadovanou přesnost. Osa Z se liší takzvaným inverzním uložením vedení. Uvedené řešení znamená, že kolejnice bude umístěna na vřeteníku stroje, nikoliv na saních. Tímto řešením bude dosaženo vyšší tuhosti osy z. Ustavení kolejnic bude probíhat stejným způsobem jako u vedení osy X a Y.

K návrhu vedení pro osu Y a Z by bylo přistupováno stejnou metodikou jako při návrhu osy X. Pro osy Y a Z budou použity stejné vedení jako pro osu X i stejný počet vozíků (4 vozíky na osu). Působící zatížení budou ovšem menší z důvodu menších hmotností a z toho plynoucích menších zatížení tohoto vedení. Taktéž ramena od působišť sil budou kratší. Z uvedených důvodů není v této práci tento návrhový výpočet uveden. Navržené vedení od firmy HIWIN HGW15CC je pro tyto osy dostatečně předimenzované a životnost vedení bude taktéž přesahující plánovanou životnost stroje.

5.6 Konstrukce stroje

V uvedené kapitole budou popsána konstrukční řešení použitá na jednotlivých uzlech modelářské CNC frézky. Základními uzly je základna stroje a příčník stroje, které se skládají z dalších podsestav.

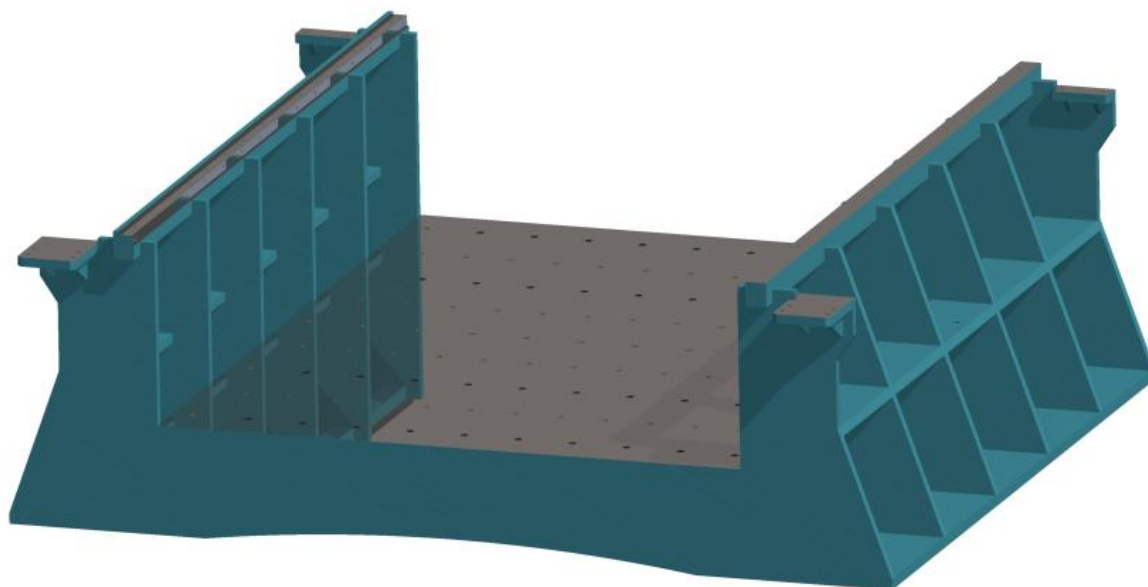
Veškeré nutné obráběcí operace budou prováděny na víceosém obráběcím centru VU 3021, kterým je vybavena firma Trimill, kde by bylo obrábění prováděno. Podle specifikací tohoto stroje bude možné celou svařovanou základnu obrábět na jedno upnutí a nebude problém dosáhnout požadované tolerance, například ploch pod lineárním vedením. Stroj disponuje v ose x pojezdem 3000 mm a v ose y pojezdem 1600 mm.

5.6.1 Základna stroje

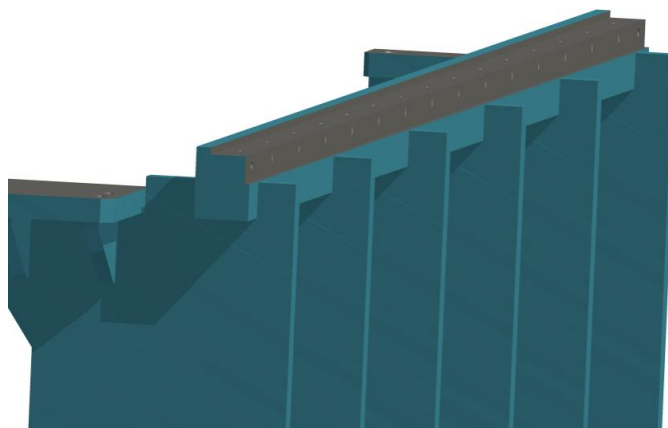
Jak již bylo uvedeno, stroj je koncepce horní gantry, z tohoto řešení se odvíjí i celková konstrukce základny stroje. Základna musí být dostatečně tuhá, aby nedocházelo k nepřijatelným deformacím při maximálním zatížení stroje.

Pro konstrukci základny byly uvažovány tři varianty: hliníkové profily, odlitek a svařenec. Varianta použití hliníkových profilů byla zamítnuta z důvodu nedostatečné tuhosti těchto profilů pro dané využití. Míra vibrací stroje bude ovlivňována i vlastní hmotností základny, která by byla při použití hliníkových profilů nízká. Výhodu nelze u daných profilů spatřovat ani v ekonomickém hledisku. Odlitek by bylo vhodné použít při výrobě větších sérií stroje. V této práci je však uvažována konstrukce pouze jednoho stroje, a proto je volena svařovaná konstrukce základny.

Základna bude svařena z jednotlivých výpalků plechu, z velké části o tloušťce 10 mm. Dále budou přivařeny dva obdélníkové profily, na kterých bude uloženo vedení. Poté bude přivařena ocelová deska s otvory, která slouží k připevnění stolu s T-drážkami atd. Po svaření bude celá základna žháná ke snížení pnutí, vzniklého při svařování. Teplota žhánání ke snížení pnutí se bude pohybovat mezi 550 °C a 650 °C. Doba výdrže na této teplotě se pohybuje mezi jednou až dvěma hodinami. Následně dojde k pozvolnému ochlazení komponent v peci nebo na vzduchu. Po procesu žhánání bude základna obrobena na jedno upnutí. Obráběním na jedno upnutí bude uspořádan obráběcí čas a dosažena požadovaná přesnost obrobku. Obráběny budou profily, na kterých bude uloženo vedení osy X. Na jednom vedení bude obrobena drážka, jejíž plocha bude sloužit jako referenční hrana (osazení) ke správnému uložení vedení dle výrobce. Dále budou na obou profilech obrobena otvory pro uchycení vedení. Dále bude obrobena ocelová deska s otvory, čímž bude zajištěna dostatečná rovinnost plochy XY vůči vedení osy X. Obrábět bude rovněž potřeba patky, sloužící k usazení držáků motorů a domečků kuličkových šroubů. Dále budou vrtány potřebné otvory (uchycení energetického řetězu, otvory pro uchycení krytování atd.). Na dolní části stroje budou vrtány otvory sloužící pro případné uchycení stroje k rámu nebo stolu. Z následujících důvodů jsou všechny výpalky navrženy s vhodným přírůstkem na obrábění. [27]



Obr. 40 Základna stroje po obrobení ploch pro vedení, stůl a uložení KŠ

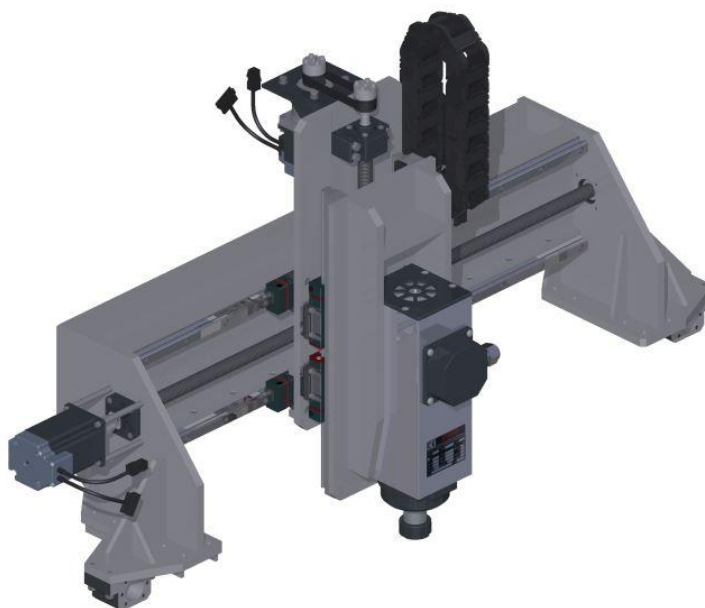


Obr. 41 Detail uložení kolejnice vedení osy x

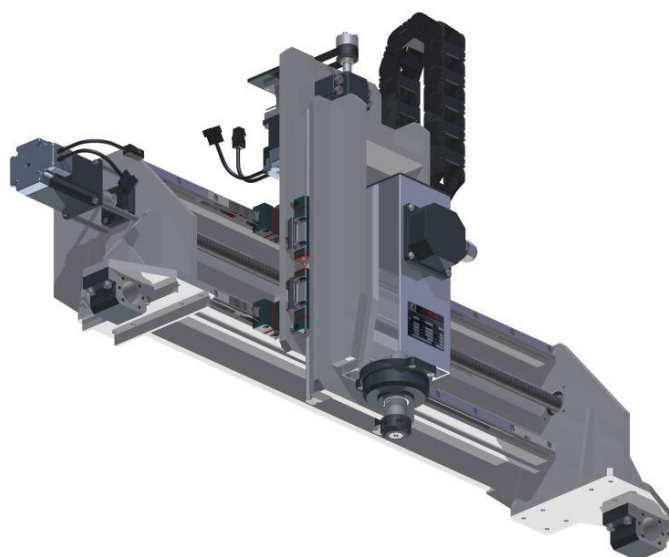
5.6.2 Příčník stroje

U příčníku byly uvažovány stejné konstrukční varianty jako u základny stroje. Volenou variantou, stejně jako u základny je nakonec svařenec.

Příčník bude svařen z několika výpalků plechu. Celý svarek bude následně žihán ke snížení vnitřního pnutí. Po žihání bude následovat obrobení požadovaných ploch. Příčník bude z technologických důvodů obráběn na dvě upnutí. Obráběny budou plochy na obdélníkových profilech, které slouží k uložení vedení osy Y. Jeden z profilů bude opět vybaven referenční hranou k správnému ustavení vedení. Dále bude obráběna referenční plocha, o kterou budou opřeny na jedné straně příčníku vozíky, čímž bude dosaženo požadované polohy příčníku vůči vedení osy X. Plochy, ke kterým budou přišroubovány domečky kuličkových šroubů musí být rovněž obrobeny. Další technologickou operací bude vrtání požadovaných děr, jako například pro uložení kuličkového šroubu osy Y atd. Všechny výpalky jsou z následujících důvodů rovněž voleny s vhodnými přídávky na obrábění.



Obr. 42 Příčník stroje (pohled zvrchu)

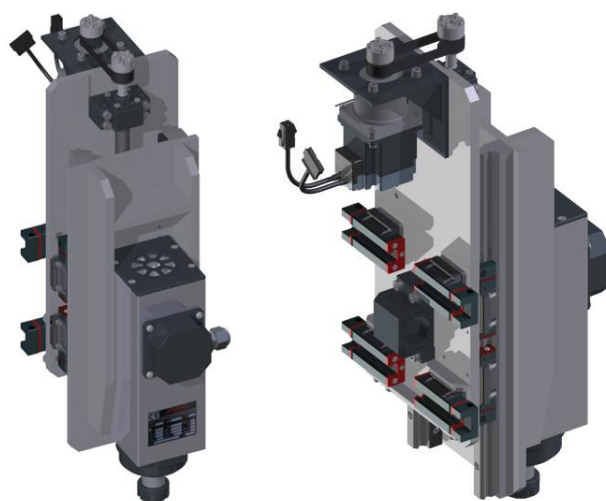


Obr. 43 Příčnick stroj (pohled zespodu)

5.6.3 Saně a vřeteník stroje

Saně vřeteníku budou tvořeny ocelovou deskou, na které budou přivařeny výpalky plechu. Po svaření budou saně žihány ke snížení vnitřního pnutí a poté budou obrobeny požadované funkční plochy - plocha pro montáž domečku kuličkového šroubu osy Z, plocha pro montáž domečku matice kuličkového šroubu osy Y, otvory pro montáž držáku motoru, referenční hrany dosedající na referenční hrany vozíku, otvory pro upevnění vozíků. Požadovaná kolmost vedení osy Y a saní bude dosažena dotlačením referenční plochy saní na referenční plochy vozíků vedení. Správná poloha vřeteníku vůči saním bude rovněž dosažena pomocí referenčních ploch, které budou zhotoveny z čelní části saní.

Vřeteník stroje bude rovněž tvořen ocelovou deskou, na které budou přivařeny výztuhy z výpalků plechu a obdélníkové profily pro ustavení vedení. Po svaření bude taktéž provedeno žihání ke snížení vnitřního pnutí a obrobení požadovaných ploch. Konkrétně obrobení obdélníkových profilů pro ustavení kolejnic vedení, obrobení plochy pro montáž domečku matice kuličkového šroubu osy Z, otvorů pro uchycení vřetene atd.



Obr. 44 Saně stroje s vřeteníkem a vřetenem

5.7 Řídicí systém stroje

CNC řídicí systém je srdce i mozek CNC obráběcího zařízení. Funkce CNC stroje bude vždy závislá na jeho výkonu, rychlosti zpracování dat, snadnosti obsluhy a programování a především spolehlivosti. Při jeho volbě je vhodné se zabývat pro jaký typ výroby je požadován, zda je doložitelná spolehlivost řídicího systému, jaký je komfort ovládání, zda splňuje snadnost přípravy NC programů a správu programů nebo zda jsou k dispozici všechny programátorské možnosti a není potřeba nic dokupovat. [28]

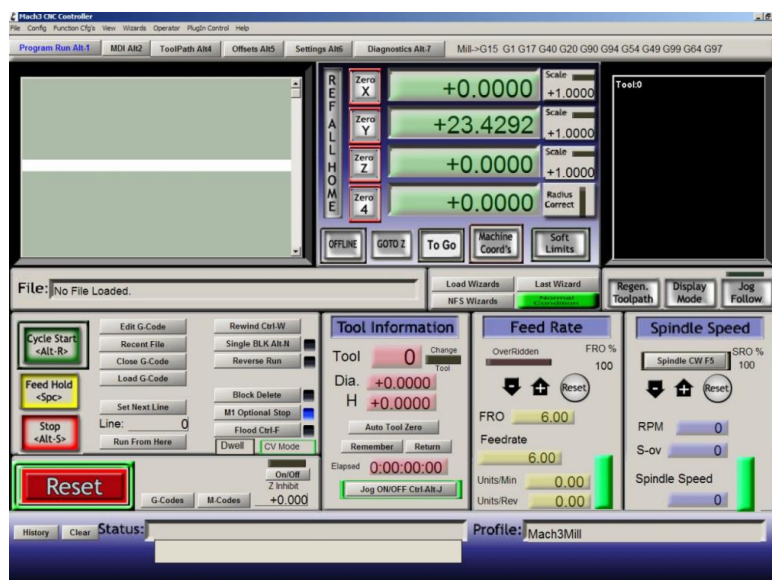
V následujících podkapitolách jsou rozebrány některé systémy, které jsou ve formě softwaru a je nutné k nim zajistit hardware v podobě PC (průmyslových) a vhodné řídicí desky nebo PLC.

5.7.1 Armote

Jedná se o 2D/3D ovládací program pro řídicí jednotky s procesorem ARM. Ovládání probíhá pod systémem Windows. Software je vybaven grafickým zobrazením drah a polohy nástroje za chodu stroje, komfortním ovládáním a širokým spektrem vstupních souborů. Tento software je ovšem samostatně neprodejný. Software REMOTE má stejné parametry jako Armote, ale slouží pro kontroléry GVC. [7]

5.7.2 Mach 3

Mach 3 je řídicí software od výrobce ArtSoft USA, který podporuje až 6-osé řízení a standardní ISO kód. Uvedený řídicí systém komunikuje přes jeden nebo dva paralelní porty (LPT) a pokud je to vyžadováno tak i přes sériový port (COM). Jedna z přídatných lineárních os může být podřízena ose X, Y nebo Z. Tyto dvě osy jsou pak polohovány vždy současně dle zpracovaného programu nebo při ručním polohování. Cena tohoto řešení se pohybuje okolo 5 000 Kč s DPH. [16]

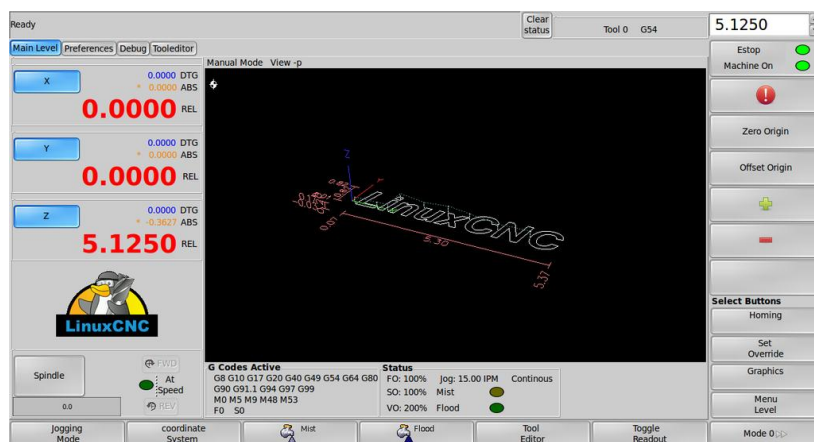


Obr. 45 Rozhraní softwaru MACH 30 [16]

5.7.3 LinuxCNC

LinuxCNC je software, který slouží na soustružení a frézování. Tento nástroj je vyvinut komunitou nadšenců systému a pro soukromé užití je zcela zdarma, vychází z Ubuntu. Umožňuje použití široké řady hardwaru, od jednoduchých připojení přes paralelní

port a ž po složitější. Výhodou je, že v Linuxu vše libovolně překonfigurovat a využít libovolné piny řídicí desky. [29]

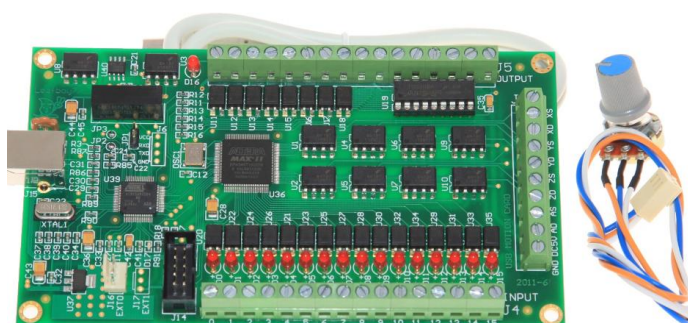


Obr. 46 Rozhraní LinuxCNC [29]

5.7.4 Volba řídicího systému pro malou modelářskou CNC frézku

Pro řízení konstruovaného stroje je po analýze zvolen software od firmy ArtSoft USA MACH 3, především pro rozšířenost systému Windows, který využívá mnoho uživatelů. Výhodou je možnost konfigurace podřízené osy, která bude využita při polohování osy X (použití dvou krokových motorů).

Frézka bude řízena z běžného kancelářského PC, jehož volbou se tato práce nezabývá. Volba PC, ať již průmyslového, či běžného kancelářského závisí na využití stroje uživatelem. Do PC bude potřeba dokoupit řídicí desku pro ovládání stroje. Bude se jednat o desku pro řízení 4-osého CNC stroje přes USB port. Volená deska je plně kompatibilní se softwarem Mach 3. Deska je dále vybavena vstupy pro nouzové zastavení, automatické nastavení délky nástroje, ruční ovladač atd.



Obr. 47 USB řídicí deska pro 4 osy [30]

5.8 Třískové hospodářství, ochranné kryty a bezpečnostní prvky

Ochranné kryty tvoří důležitou součást obráběcího stroje a pro jeho provoz mají více významů. Jejich úkolem je ochrana obsluhy, životního prostředí a velmi často i ochrana

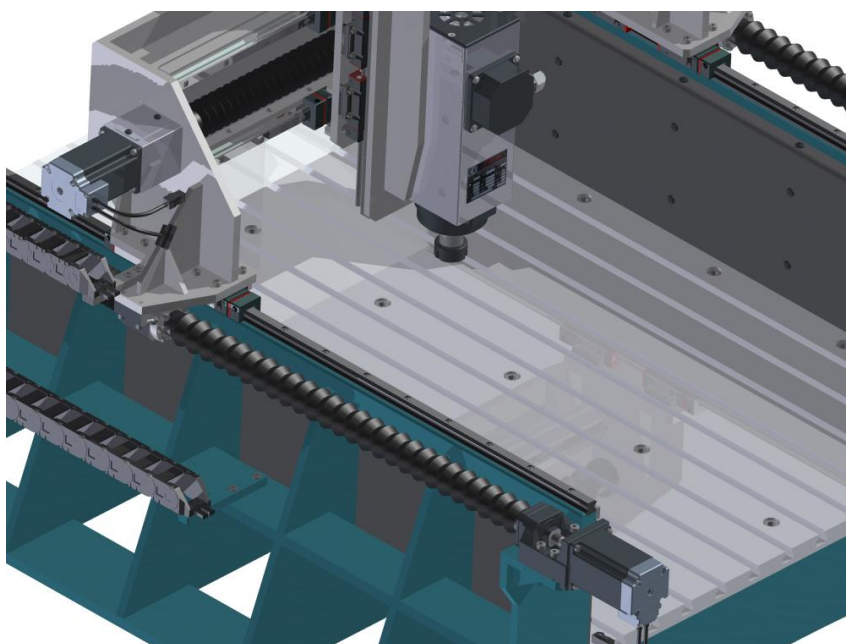
samotného stroje. Kryty musí být konstrukčně řešeny tak, aby splnily náročné provozní požadavky, normy a nařízení. Nevyhnou se však ani požadavkům na design. [1]

V této práci bude u konstrukce CNC frézky řešeno pouze základní krytování nutných částí k provozu stroje a také rotujících částí stroje, které by mohly způsobit zranění obsluhy. Práce se nevěnuje kompletnímu návrhu ochranných krytů a bezpečnosti stroje dle nařízení EU, vlády České republiky a harmonizovaných norem. Řešení této problematiky by se vymykalo rozsahu této práce.

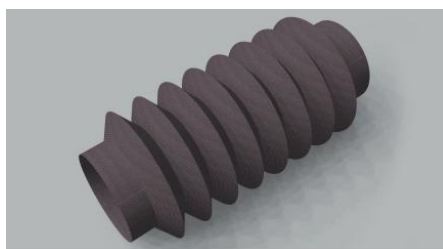
Frézka nebude disponovat třískovým dopravníkem. Vzhledem k určení stroje bude pracovní prostor po obrábění očištěn například stlačeným vzduchem nebo mechanicky obsluhou.

V první řadě bude řešeno krytování pracovního prostoru stroje, které bude vyrobeno z plechu a plexiskla. Plech bude zakrývat boční část stroje a plexisklo čelní části stroje. Z přední části stroje bude krycí plexisklo zasunuto ve dvou lištách a bude vybaveno madly pro snadné odejmutí ze stroje. Pracovní prostor je nutné zakrytovat z důvodu odletujícího materiálu při třískovém obrábění (tzv. třísek).

U posuvových částí stroje budou zakrytovány pouze kuličkové šrouby na ose X a Y. Kuličkové šrouby budou zakryty pomocí kruhových krycích měchů od firmy HENNLICH. Osa z je uložena inverzně a není nutné, aby byl zde kuličkový šroub krytován.



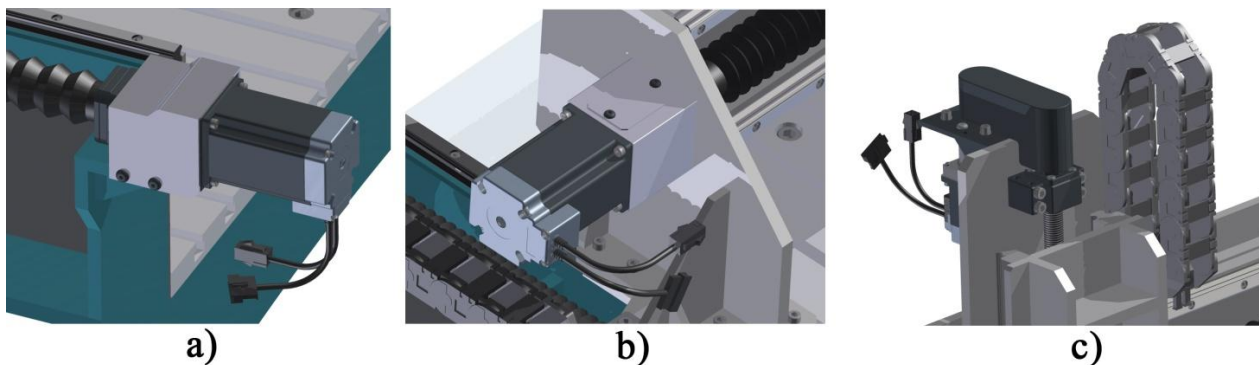
Obr. 48 Krycí měchy kuličkových šroubů (x, y)



Obr. 49 Krycí měch kuličkového šroubu [31]

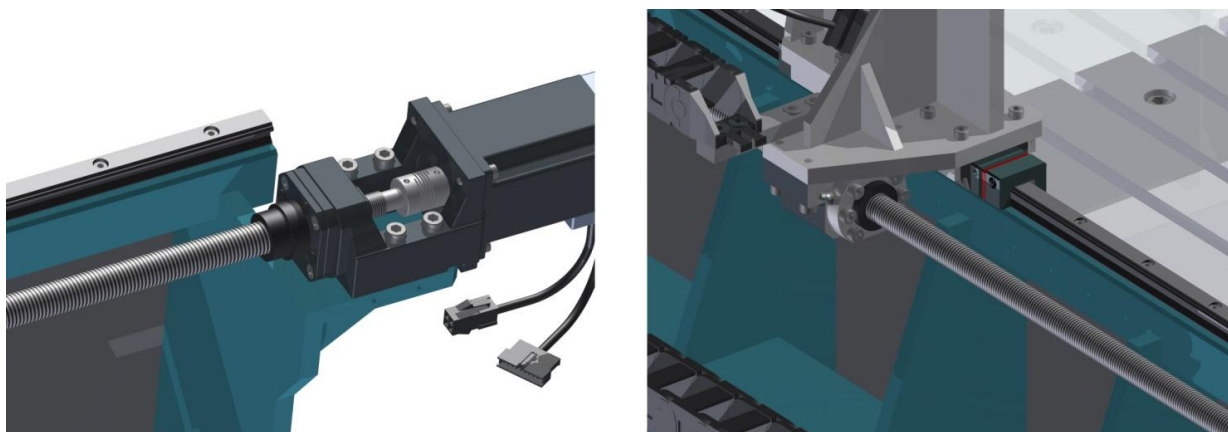
Lineární vedení nebudou z konstrukčních důvodů krytovány. Vozíky vedení jsou vybaveny stěrači, které zabrání vniknutí třísek do vozíku. Tato ochrana je pro dané využití dostatečná.

V poslední řadě budou zakrytovány všechny rotační součásti na stroji, konkrétně řemen s řemenicemi pro pohon osy Z a prostor mezi motorem a kuličkovým šroubem u os X a Y. U osy Y bude kryt vybaven otvorem pro dotažení pružné spojky mezi motorem a šroubem.



Obr. 50 Krytování stroje - a) kryt motoru na ose X, b) kryt motoru na ose Y, c) kryt řemenic a řemene na ose Z

Zařízení bude vybaveno gumovými dorazy, které budou sloužit pro krizový stav, pokud by jakákoliv z os překročila své definované limity posuvu. V takovém případě dojde k opření o doraz a vzrůstu proudu na krokovém motoru, což je signálem pro jeho odpojení. Dále budou na dorazech vysoustruženy osazení pro upevnění krycích měchů kuličkových šroubů. Dorazy budou na příslušné plochy z konstrukčních důvodů lepeny. Lepený spoj by měl být dostatečný, jelikož dorazy budou namáhány tahem a tlakem, namáhání odlupováním, které je pro lepené spoje kritické, hrozit nebude.



Obr. 51 Dorazy osy X

Dalším bezpečnostním prvkem stroje bude tzv. tlačítko central stop, které slouží k zastavení stroje, pokud by nastal jakýkoliv krizový stav.

5.9 Příslušenství stroje

Konstruovaný stroj bude možné vybavit příslušenstvím, které bude uvedeno v následujících podkapitolách. Uvedené příslušenství nebude součástí základní dodávky stroje a jeho volba bude záviset pouze na preferencích uživatele.

5.9.1 Ruční ovladač

Jedná se o ovladač, který slouží k ovládání os stroje především při najíždění nástrojem na roh obrobku a zjištění jeho polohy na stole stroje. Ovladač je vybaven držákem pro snadné uložení (přípevnění šrouby/magnety). Ovladač je dále vybaven STOP tlačítkem. [16]



Obr. 52 Ruční ovladač os stroje [16]

5.9.2 Pevný senzor osy z

Tento senzor slouží k měření vzdálenosti špičky nástroje od materiálu při výměně nástroje. Uvedený senzor je vhodné použít především u 3D obrábění, kde materiál, na kterém byl změřený první nástroj byl již odstraněn. [7]



Obr. 53 Senzor osy z [7]

5.9.3 Čtvrtá – rotační osa

Čtvrtá osa slouží k obrábění složitých obrobků, na které by tři osy nebyly dostatečné. Uvedené řešení nabízí e-shop cnc.inshop.cz. Jedná se o kompletní řešení pro implementaci rotační osy do stávajícího stroje. Sklíčidlo je připojeno převodem 1:6 na krokový motor Nema23 s výkonem 1,75 Nm. Při použití vnějších čelistí je možno opracovávat průměr až 55 mm. [30]



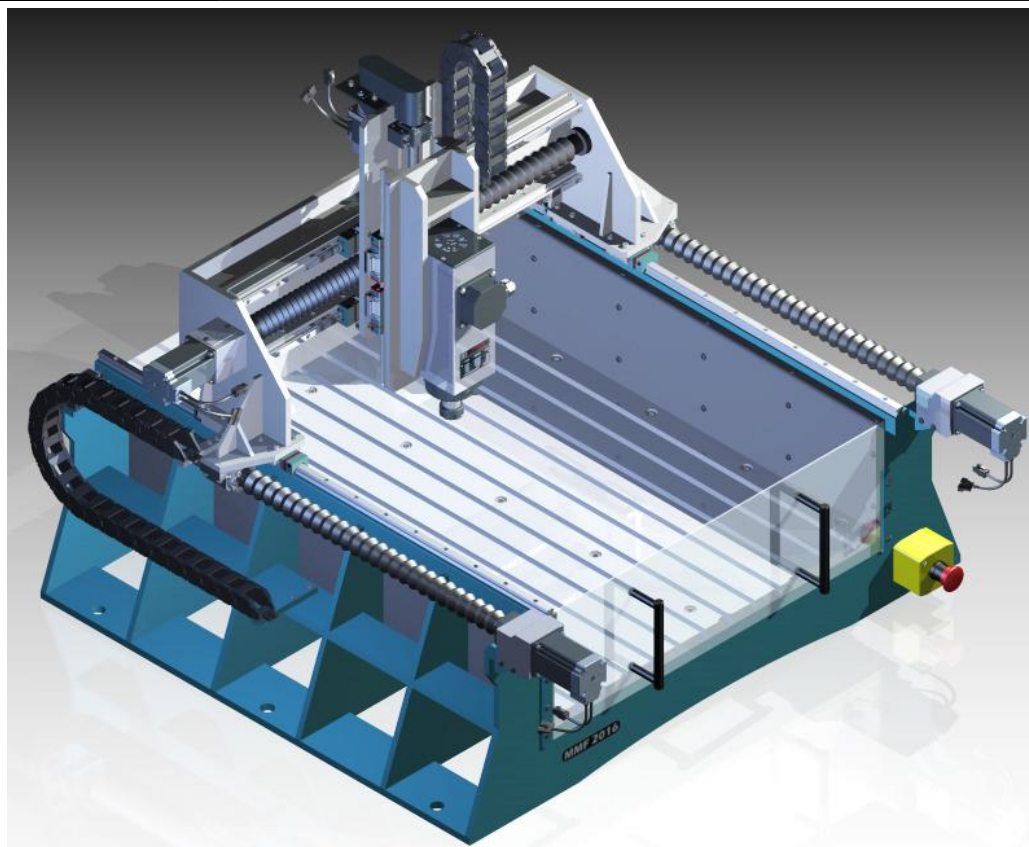
Obr. 54 Rotační osa [30]

5.10 3D model navrženého stroje MMF 2016 a jeho parametry

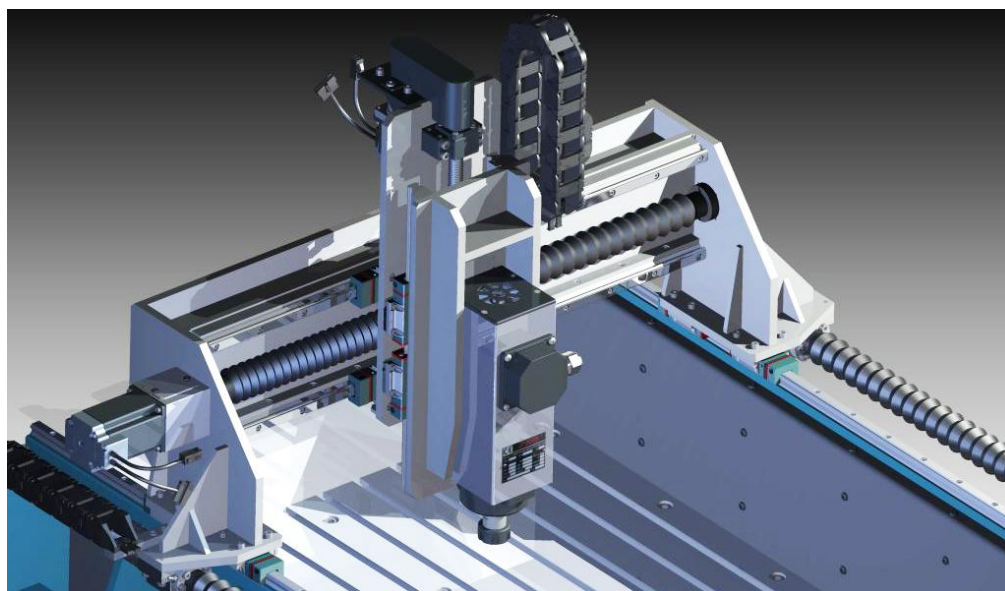
V následující kapitole jsou v Tab. 25 shrnuty parametry navrženého stroje. Další částí je kompletní vizualizace pomocí vytvořeného 3D modelu stroje v programu Autodesk Inventor 2015 Professional. Normalizované komponenty byly čerpány ze zdrojů výrobců a internetových knihoven 3D modelů, které jsou volně k dispozici [32], [33].

Tab. 25 Výsledné parametry stroje MMF 2016

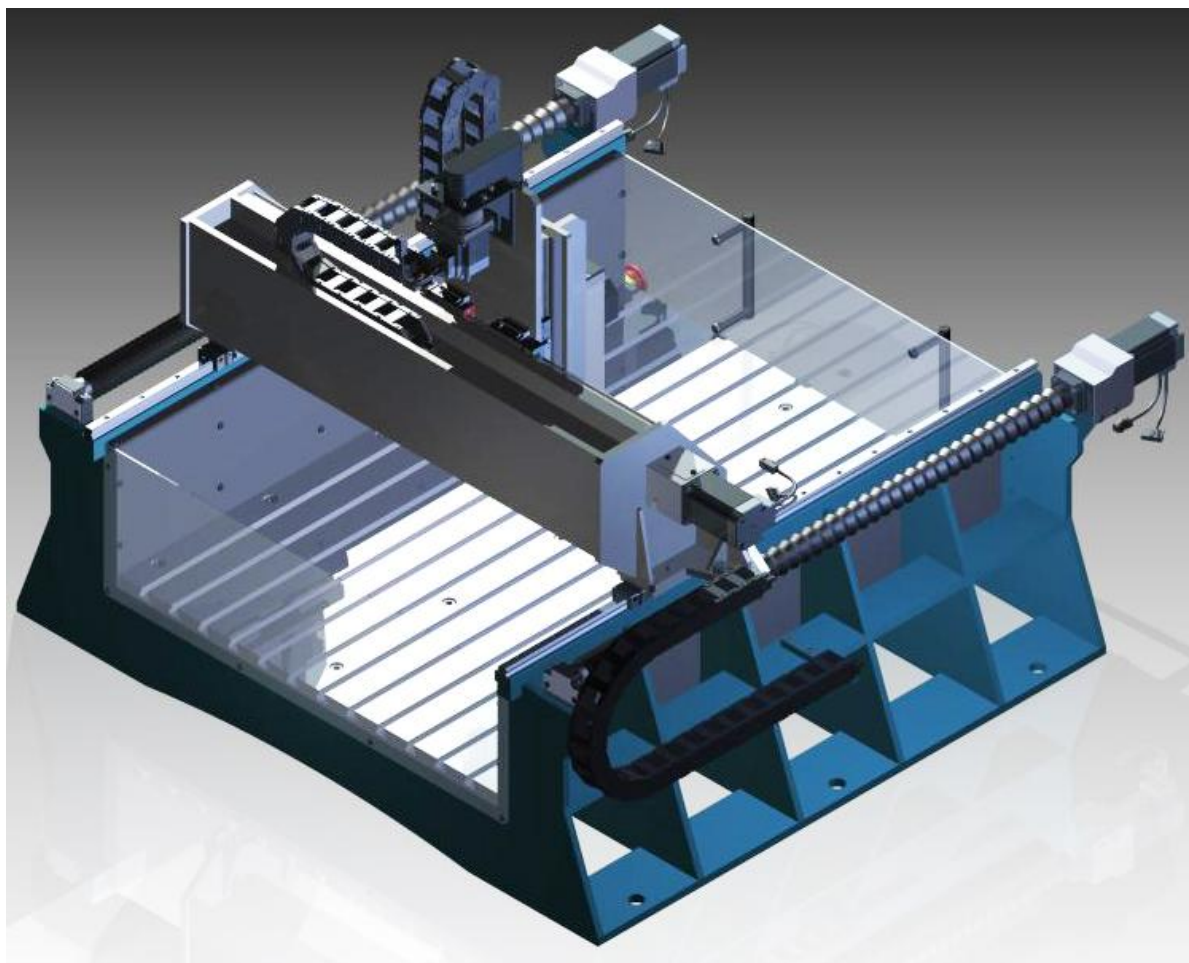
Specifikace	Parametry
Řídící software	MACH 3
Rozměry pracovního stolu	860 x 640 mm
Rozměry stroje (v x š x h)	820 x 990 x 1100 mm
Rozsah posuvu osy X	700 mm
Rozsah posuvu osy Y	480 mm
Rozsah posuvu osy Z	220 mm
Rychlost rychloposuvu osy X, Y	4800 mm.min ⁻¹
Rychlost rychloposuvu osy Z	3000 mm.min ⁻¹
Krouticí moment motoru osy X, Y, Z	1,853 N.m
Počet T-drážek	12
Velikost T-drážky	10 mm
Využitelné otáčky vřetene	6000 - 24000 ot.min ⁻¹
Upínání nástroje	Kleštinový upínač ER20
Výkon motoru vřetene	2000 W
Mazání	Systém zásobníků maziva SKF



Obr. 55 Vizualice navrženého stroje MMF 2016 (pohled zepředu)



Obr. 56 Pohled na příčník a vřeteno stroje MMF 2016



Obr. 57 Vizualice navrženého stroje MMF 2016 (pohled zezadu)

6 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce byla rešerše v oblasti dostupných modelářských CNC frézek, ať již produkčních nebo hobby kategorií. Dalším z cílů byla volba vhodných parametrů pro konstruovaný stroj a jejich zdůvodnění, konstrukční výpočty a návrh stroje, tvorba výkresové dokumentace a 3D modelu výsledného řešení konstrukce.

Ve druhé kapitole této práce byla provedena rešerše frézovacích strojů z obecného hlediska, ve třetí kapitole byla již provedena rešerše modelářských CNC frézovacích strojů, které jsou v současné době dostupné především na českém trhu. V oblasti modelářských frézek se využívají především dvě koncepce uspořádání stroje, a to koncepce vycházející z konstrukčního řešení stolní frézky a koncepce vycházející z portálové konstrukce stroje. Jak je patrné z této rešerše, portálová koncepce je využívána pro dané účely ve větší míře, ať již se jedná o hobby nebo profesionální konstrukce stroje. Portálové frézky jsou nazývány také jako CNC gravírovací stroje. Nejčastější konstrukce uvedených strojů je typu spodní gantry. Tyto stroje slouží pro školící účely například ve školách, ale využití nalézají i v reklamních agenturách, výrobních podnicích atd. Ve čtvrté kapitole je provedeno celkové porovnání vybraných parametrů, na jejichž základě jsou voleny parametry navrženého stroje.

Pátá kapitola se zabývá konstrukčním návrhem CNC frézky včetně konstrukčních výpočtů důležitých uzlů stroje. V této práci je voleno konstrukční řešení portálové frézky typu horní gantry, z důvodu vyšší tuhosti stroje. Požadavkem je obrábění slévarenské hliníkové slitiny s obsahem křemíku vyšším než 13%, a proto je tuhost stroje důležitým parametrem. Po této volbě byly vypočteny síly vznikající při procesu frézování a vrtání se zvolenými parametry. Z vypočtených sil byla následně provedena volba vřetene, které je voleno od firmy TeknoMotor a bude vybaveno frekvenčním měničem pro změnu otáček. Další část se zabývá návrhem pohonu posuvové soustavy osy X, Y a Z. Pro tento návrh slouží konstrukční výpočty, ze kterých je vycházeno při volbě potřebných komponent (kuličkové šrouby, motory, vedení). Na všech osách je použit kuličkový šroub a krokový motor se zpětnou vazbou. Vedení pro všechny osy je voleno lineární kuličkové. V současné době je dobrá dostupnost těchto moderních prvků, které využívají běžná CNC zařízení, i pro menší stroje. Dále je volen vhodný systém stroje a hardwarové komponenty potřebné pro běh zařízení. Práce se zabývá i základní otázkou krytování, která však není řešena dopodrobna a zabývá se především krytváním rotujících částí stroje, aby bylo zamezeno zranění obsluhy. V závěru práce je uvedeno výsledné konstrukční řešení v podobě 3D modelu (který je součástí přílohy).

Vzhledem k zadání a rozsahu diplomové práce nejsou v této práci detailněji rozebrány některé oblasti návrhu stroje. Jedná se například o řešení kompletní bezpečnosti stroje, kompletního krytování a designu stroje, vytvoření schématu elektroinstalace atd. Těmito částmi by bylo případně vhodné zabývat se do budoucna.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. Praha: MM publishing, s.r.o., 2014, 684 s. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [2] BORSKÝ, Václav. *Obráběcí stroje*. Brno: VUT, 1992, 216 s. ISBN 80-214-0470-1.
- [3] BORSKÝ, Václav. *Základy stavby obráběcích strojů*. Vyd. 2., přeprac. Brno: VUT, 1991. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-0361-6.
- [4] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš (ed.). *Konstruování strojních součástí*. Překlad Martin Hartl. V Brně: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [5] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- [6] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. Úvaly: Albra, 2003. ISBN 80-864-9074-2.
- [7] GRAVOS.CZ - CNC TECHNOLOGIE A OBRÁBĚCÍ STROJE [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.gravos.cz>
- [8] MERKURTOYS s.r.o. [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.merkurtoys.cz/vyrobky/3d-cnc-frezovaci-stroj-mc30ft>
- [9] První hanácká BOW [online]. [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: <http://cnc.bow.cz/>
- [10] CNC Konečný | Výroba a prodej CNC strojů, CNC frézek na zakázku [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.cnc-konecny.cz/cnc-stroje>
- [11] Medvědovo Multicoptery a jiné RC modely [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.brum.cz/index.php/modelarstvi/tronplus/87-tronzakolik>
- [12] TRONCNC [online]. [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: http://www.tron-cnc.de/tron_plus.html
- [13] Cau Cau [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.cnc1.eu/sk/kompasf600.htm>
- [14] GMTECHNIK [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.gmtechnik.cz/nastroje-brusivo-meridla/britove-desticky-pramet-tools.htm>
- [15] SANDVIK Coromant [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/pages/default.aspx>
- [16] CNCshop.cz [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://cncshop.cz/>
- [17] Damencnc.com [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://damencnc.com/en/milling-motors/teknomotor/electrospindle/1126>
- [18] HIWIN.cz. Lineární vedení, firemní literatura a technické informace [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.hiwin.cz/cz/download>
- [19] HIWIN.cz. Kuličkové šrouby, firemní literatura a technické informace [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.hiwin.cz/cz/download>
- [20] RAVEO [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.raveo.cz/hybridni-krokov-motory-sservo>
- [21] www.c-n-c.cz [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.c-n-c.cz/>

-
- [22] *Continental* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: http://www.contitech.de/pages/produkte/antriebsriemen/antrieb-industrie/contitech-suite_en.html
 - [23] *RS* [online]. [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: <http://cz.rs-online.com/web/p/rozvodove-remeny/4746491/>
 - [24] *TYMA* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.tyma.cz/produkty/remenice/ozubene/htd-standard/zs-5m/>
 - [25] *T.E.A. TECHNIK s.r.o.* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.teatechnik.cz/tlk-110/>
 - [26] *Mm průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/linearni-versus-kluzne-vedeni.html>
 - [27] *Bodycote* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.bodycote.com/cs-CZ/services/heat-treatment/stress-relieving.aspx>
 - [28] *T-support* [online]. [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: <https://www.t-support.cz/kat/cnc-ridici-system-je-srdce-i-mozek-cnc-obrabeciho-stroje-1>
 - [29] *Elektronovinky.cz* [online]. [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: <http://www.elektronovinky.cz/software/free-software-na-frezovani-soustruzeni-linuxcnc>
 - [30] *Cnc.inshop.cz* [online]. [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: <https://cnc.inshop.cz/usb-ridici-desky/usb-ridici-deska-pro-4-osy>
 - [31] *HENNLICH, Firemní literatura* [online]. [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: http://lin-tech.hennlich.cz/fileadmin/user_upload/H CZ/Download/Lin-tech/pdf/2013_katalog_kryptovani_KRYCI_MECHY_SRO_03_PRINT.pdf
 - [32] *PARTcommunity* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <https://b2b.partcommunity.com/community/members/home>
 - [33] *Traceparts* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: [http://www.tracepartsonline.net/\(S\(1imypvnnrehwg5g4njmvr2bk\)\)/content.aspx](http://www.tracepartsonline.net/(S(1imypvnnrehwg5g4njmvr2bk))/content.aspx)

8 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, TABULEK A OBRÁZKŮ

AC	Střídavý proud
Atd	A tak dále
CAD	Počítačem podpořený návrh
CAM	Počítačem podporovaná výroba
CNC	Číslicové řízení pomocí počítače
EMI	Elektromagnetická interference (zhoršení provozu vlivem elektromagnetického rušení)
EU	Evropská unie
KŠM	Kuličkový šroub a matice
LPT	Paralelní port
COM	Sériový port
NC	Číslicové řízení
Obr.	Obrázek
PC	Osobní počítač
PLC	Programovatelný automat pro řízení technologických procesů
Si	Křemík
Tab.	Tabulka
USB	Univerzální sériová sběrnice

Značka	Jednotka	Popis
a	[m.s ⁻²]	Lineární zrychlení
A _D	[mm ²]	Průřez třísky při vrtání
a _e	[mm]	Šířka záběru
a _p	[mm]	Hloubka záběru
b _D	[mm]	Šířka třísky při vrtání
C ₀	[N]	Statická tuhost KŠM
C _{dyn}	[N]	Dynamická tuhost KŠM
C _{dynv}	[N]	Dynamická únosnost vozíku vedení
d _{0š}	[mm]	Jmenovitý průměr kuličkového šroubu
d _k	[mm]	Malý průměr kuličkového šroubu
D _N	[-]	Otáčkový faktor
D _{Nf}	[mm]	Průměr frézy
D _{Nmax}	[-]	Maximální otáčkový faktor
D _{Nv}	[mm]	Průměr vrtáku

f_1	[-]	Součinitel tření ve vodících plochách valivého vedení
f_2	[-]	Ekvivalentní součinitel tření v KŠM (na poloměr šroubu)
F_{cf}	[N]	Řezná síla při frézování
F_{Cv}	[N]	Řezná síla při vrtání
F_f	[N]	Síla posuvu při vrtání
F_{gx}	[N]	Gravitační síla od hmotnosti příčnicku
f_H	[-]	Faktor tvrdosti
F_k	[N]	Přípustné axiální zatížení KŠ
F_{kmax}	[N]	Maximální přípustné zatížení KŠ
f_o	[mm.ot ⁻¹]	Posuv na otáčku při vrtání
F_p	[N]	Předepnutí KŠ
F_r	[N]	Radiální síla působící na vozík vedení
f_T	[-]	Faktor teploty
F_t	[N]	Tečná síla působící na vozík vedení
f_W	[-]	Faktor zatížení
f_z	[mm.zub ⁻¹]	Posuv na zub při frézování
f_{zv}	[mm.zub ⁻¹]	Posuv na zub při vrtání
h_D	[mm]	Tloušťka třísky při vrtání
h_m	[mm]	Střední tloušťka třísky při frézování
i_1	[-]	Převodový poměr řemenového převodu
J_1	[kg.m ²]	Moment setrvačnosti řemenice se svěrným pouzdem
J_2	[kg.m ²]	Moment setrvačnosti řemenice se svěrným pouzdem
J_{br}	[kg.m ²]	Moment setrvačnosti brzdy
J_{ks}	[kg.m ²]	Moment setrvačnosti KŠ
J_m	[kg.m ²]	Moment setrvačnosti posuvných hmot redukováný do osy šroubu
J_{mot}	[kg.m ²]	Moment setrvačnosti krokového motoru
J_{rhm}	[kg.m ²]	Celkový moment setrvačnosti redukováný na hřídel motoru
J_{spoj}	[kg.m ²]	Moment setrvačnosti spojky
k_{c1}	[MPa]	Měrná řezná síla materiálu
k_{cf}	[MPa]	Měrná řezná síla při frézování
k_{cv}	[MPa]	Měrná řezná síla při vrtání
k_d	[-]	Koeficient v závislosti na uložení pro otáčky

k_k	[-]	Koeficient v závislosti na uložení pro vzpěr
L	[ot.min ⁻¹]	Životnost KŠ v otáčkách
l_d	[mm]	Vzdálenost mezi ložisky
L_h	[h]	Životnost KŠ v hodinách
L_v	[m]	Nominální životnost vozíku vedení v metrech
L_{vh}	[h]	Nominální životnost vozíku vedení v hodinách
m_c	[-]	Nárůst měrné řezné síly
M_d	[N.m]	Minimální potřebný moment dle dynamického hlediska
M_G	[N.m]	Moment od zatížení pohonu vlivem složek momentů od přesouvaných hmot
M_{GT}	[N.m]	Ztrátový moment pasivních odporů způsobený gravitací přesouvaných hmot
M_{kf}	[N.m]	Kroutící moment při frézování
M_{KSM}	[N.m]	Ztrátový moment pasivních odporů způsobený odporem v KŠM
M_{kv}	[N.m]	Kroutící moment při vrtání
m_{p1}	[kg]	Hmotnost příčnicku bez saní s vřetenem
M_s	[N.m]	Minimální potřebný moment dle statického hlediska
m_{sv}	[kg]	Hmotnost saní s vřetenem
M_{zdrhm}	[N.m]	Celkový moment zátěže redukováný na hřídel motoru
n_f	[ot.min ⁻¹]	Potřebné otáčky pro frézování
n_k	[ot.min ⁻¹]	Kritické otáčky KŠ
n_{max}	[ot.min ⁻¹]	Maximální otáčky KŠ
n_s	[ot.min ⁻¹]	Otáčky KŠ při rychloposuvu
n_v	[ot.min ⁻¹]	Potřebné otáčky pro vrtání
P	[N]	Ekvivalentní statické zatížení vozíku vedení
P_f	[W]	Potřebný výkon při frézování
P_v	[W]	Potřebený výkon pro vrtání
s	[mm]	Stoupání kuličkového šroubu
t	[s]	Doba rozběhu na v_{nax}
T_v	[HB]	Tvrdost materiálu
$v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6$	[mm]	Vzdálenosti viz. Obr. 36, Obr. 37, Obr. 38
v_{cf}	[m.min ⁻¹]	Řezná rychlost při frézování
v_{cv}	[m.min ⁻¹]	Řezná rychlost při vrtání
v_f	[mm.min ⁻¹]	Rychlost posuvu při frézování

V_{fv}	$[\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$	Rychlost posuvu při vrtání
V_{\max}	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$	Maximální rychlost rychloposuvu
Z_{Nf}	$[-]$	Počet zubů frézy
Z_{Nv}	$[-]$	Počet zubů vrtáku
α	$[\circ]$	Úhel sklonu vedení
γ	$[\circ]$	Nástrojový ortogonální úhel čela vrtáku
γ_o	$[\circ]$	Nástrojový ortogonální úhel čela frézy
ϵ_m	$[\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}]$	Úhlové zrychlení motoru
ϵ_s	$[\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}]$	Úhlové zrychlení KŠ
η_l	$[-]$	Účinnost řemenového převodu
η_c	$[-]$	Celková účinnost
η_L	$[-]$	Účinnost pro oboustranné uložení
η_s	$[-]$	Účinnost KŠM
η_v	$[-]$	Účinnost valivého vedení
K_r	$[\circ]$	Nástrojový úhel nastavení ostří frézy
K_{rv}	$[\circ]$	Nástrojový úhel nastavení ostří vrtáku

8.1 Seznam tabulek

<i>Tab. 1 Parametry stroje Merkur MC30FT [8]</i>	16
<i>Tab. 2 Parametry stroje NUMCO KX3 [9]</i>	17
<i>Tab. 3 Parametry stroje NUMCO SHG 0404 [9]</i>	18
<i>Tab. 4 Parametry routeru řady RM SX [10]</i>	19
<i>Tab. 5 Parametry stroje TRON+ [11]</i>	20
<i>Tab. 6 Parametry stroje Kompas F-600 [13]</i>	21
<i>Tab. 7 Parametry stroje Gravos IK 500 [7]</i>	22
<i>Tab. 8 Navržené parametry pro konstrukci stroje</i>	26
<i>Tab. 9 Technologické operace prováděné na stroji</i>	27
<i>Tab. 10 Parametry pro drážkové frézování frézou PRAMET 10E2S70-22A10 NEPU [14]</i>	27
<i>Tab. 11 Materiálové konstanty obráběného materiálu [15]</i>	28
<i>Tab. 12 Parametry pro vrtání vrtákem PRAMET 303DA-M o průměru 6 mm [14]</i>	29
<i>Tab. 13 Parametry vřetena TeknoMotor C41/47-C-DB-P-ER25 [17]</i>	31
<i>Tab. 14 Parametry pro návrh posuvové soustavy X</i>	33
<i>Tab. 15 Velikosti momentů setrvačnosti součástí osy X</i>	35
<i>Tab. 16 Parametry pro návrh posuvové soustavy Y</i>	38
<i>Tab. 17 Velikosti momentů setrvačnosti součástí osy Y</i>	40
<i>Tab. 18 Parametry pro návrh posuvové soustavy Z</i>	43
<i>Tab. 19 Velikosti momentů setrvačnosti součástí osy Z</i>	45
<i>Tab. 20 Parametry pro výpočet zatížení levé a pravé strany vedení</i>	49
<i>Tab. 21 Parametry pro výpočet zatížení předního a zadního vozíku levé strany vedení</i>	50
<i>Tab. 22 Parametry pro výpočet zatížení předního a zadního vozíku pravé strany vedení</i>	51
<i>Tab. 23 Shrnutí zatížení na vozících u vedení osy x</i>	52
<i>Tab. 24 Parametry pro výpočet životnosti vozíku vedení</i>	52

Tab. 25 Výsledné parametry stroje MMF 2016	62
--	----

8.2 Seznam obrázků

Obr. 1 Popis stolní frézky.....	12
Obr. 2 Portálová frézka firmy Gravos [7]	13
Obr. 3 Popis frézky koncepce spodní gantry.....	13
Obr. 4 Popis frézky koncepce horní gantry	14
Obr. 5 Popis frézky s pohyblivým stolem	14
Obr. 6 Logo firmy Merkur [8].....	15
Obr. 7 Modelářská frézka MC30FT [8]	15
Obr. 8 Logo firmy První hanácká BOW [9]	16
Obr. 9 Stolní frézka NUMCO KX3 [9]	17
Obr. 10 CNC router NUMCO SHG 0404 [9]	18
Obr. 11 Logo firmy CNC Konečný [10]	19
Obr. 12 CNC router řady RM SX [10]	19
Obr. 13 CNC frézka TRON+ [12].....	20
Obr. 14 3D CNC frézka Kompas F-600 [13].....	21
Obr. 15 3D CNC router Gravos IK 500 [7]	22
Obr. 16 Porovnání velikosti rozsahu posuvů vybraných strojů	23
Obr. 17 Porovnání velikostí pracovních stolů u vybraných strojů	23
Obr. 18 Porovnání velikostí rychloposuvů vybraných strojů	24
Obr. 19 Porovnání výkonů vřetene a elektrického připojení vybraných strojů	24
Obr. 20 Monolitní fréza PRAMET E2S NEPU [14].....	27
Obr. 21 Vrták PRAMET 303DA-M [14].....	29
Obr. 22 Vřeteno KRESS FME 1050-1 [16]	30
Obr. 23 Vřeteno TeknoMotor C41/47-C-DB-P-ER25 [16]	31
Obr. 24 Výkonově - momentová křivka vřetena TeknoMotor C41/47-C-DB-P-ER25 [17]	31
Obr. 25 Frekvenční měnič Delta Electronics VFD022EL21A [16].....	32
Obr. 26 Výpočtový model posuvové souřadnice X	33
Obr. 27 Krokové motory S-Servo [20]	37
Obr. 28 Momentová charakteristika krokového motoru S-Servo SM-56L [20].....	37
Obr. 29 Model krokového motoru s držákem, domečkem a pružnou spojkou	37
Obr. 30 Výpočtový model posuvové souřadnice Y	38
Obr. 31 Uložení kuličkového šroubu pro pohon osy Z	41
Obr. 32 Řemen HTD [23]	42
Obr. 33 Výsledky výpočtu řemenového spoje ze softwaru firmy Contitech [22]	42
Obr. 34 Výpočtový model posuvové souřadnice Z	43
Obr. 35 Kluzné vedení [26].....	47
Obr. 36 Kuličkové vedení firmy HIWIN [18].....	47
Obr. 37 Síly působící na lineární vedení - čelní pohled	48
Obr. 38 Síly působící na lineární vedení - pohled zleva (levá strana vedení)	49
Obr. 39 Síly působící na lineární vedení - pohled zprava (pravá strana vedení)	51
Obr. 40 Základna stroje po obrobení ploch pro vedení, stůl a uložení KŠ	54
Obr. 41 Detail uložení kolejnice vedení osy x.....	55
Obr. 42 Příčnick stroje (pohled zvrchu).....	55
Obr. 43 Příčnick stroje (pohled zespodu).....	56

<i>Obr. 44 Saně stroje s vřeteníkem a vřetenem</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 45 Rozhraní softwaru MACH 30 [16].....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 46 Rozhraní LinuxCNC [29].....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 47 USB řídicí deska pro 4 osy [30].....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 48 Krycí měchy kuličkových šroubů (x, y)</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 49 Krycí měch kuličkového šroubu [31]</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 50 Krytování stroje - a) kryt motoru na ose X, b) kryt motoru na ose Y, c) kryt řemenic a řemene na ose Z</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 51 Dorazy osy X.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 52 Ruční ovladač os stroje [16]</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 53 Senzor osy z [7]</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 54 Rotační osa [30].....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 55 Vizualice navrženého stroje MMF 2016 (pohled zepředu)</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 56 Pohled na příčník a vřeteno stroje MMF 2016</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 57 Vizualice navrženého stroje MMF 2016 (pohled zezadu)</i>	<i>64</i>

9 SEZNAM PŘÍLOH

Výkres sestavení:	MODELÁŘSKÁ FRÉZKA	0-S-145765/1
Výkres svarku:	OSA Z SVAREK	2-S-145765/1-5
Výrobní výkres	KULIČKOVÝ ŠROUB OSY X	2-D-145765/13-4-7
CD:	Elektronická verze diplomové práce Výkres sestavení, svarku, výrobní výkres v elektronické formě Vyrenderované obrázky stroje 3D model stroje	